Spektrum DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT 5/07 MAI 2007

SCHWERPUNKT GALLIER
Das von Cäsar verunglimpfte Kulturvolk

ERINNERUNG TOTAL
Das ganze Leben auf der Festplatte

EMOTIONEN
Warum uns manches peinlich ist

Gegenwind aus dem Schwarzen Loch

Wie die Gravitationsmonster die Geburt der Sterne behindern

6,90 € (D/A) · 13,50 sFr/Luxemburg 8,– €
D6179E

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Leben in der Parallelwelt

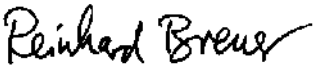
Leben Sie eigentlich immer noch analog oder wohnen Sie schon im »Second Life«, jener schönen neuen, digitalen Onlinewelt? Ich gestehe: Ich bin noch kein Second-Lifer, obwohl ich schon mal reingeschnuppert habe. Seit fünf Jahren entwickelt sich dieser virtuelle Lebensersatz. Man kann dort in Läden einkaufen (ja, sogar mit konvertierbarem Geld), Grundstücke und Immobilien erwerben, zu Vorträgen oder Rockkonzerten gehen. Schweden eröffnet in diesem Nirwanien eine eigene Botschaft, und kürzlich las ich, dass gerade eine deutsche Radiostation aufgebaut wird – rein digital, versteht sich. Drei Millionen registrierte Besucher-Bewohner soll das »Zweite Leben« haben, die per frei wählbaren Figuren (Avataren) dort herumspazieren und, nun ja, »leben« können.

Das alles mag nur eine weitere Suchtstation für Elektronikautisten sein. Aber wer will schon vorhersagen, was daraus wird, wenn solche Simulationswelten einmal bequemer, unterhaltsamer und vielleicht sogar nützlicher werden? Wie bei Wikipedia sind es schließlich vor allem die Besucher selbst, die diese Parallelwelten aufbauen. Ähnliches sehe ich auch bei unserem Beitrag »Erinnerung total« (S. 84). Der Softwareforscher Gordon Bell hat es sich zur Aufgabe gemacht, »sein ganzes Leben« digital aufzuzeichnen. Was heißt das? Jahre hat er gebraucht, um Dokumente seiner noch allzu analogen Vergangenheit komplett zu digitalisieren – Dinge wie Briefe, Urlaubsfotos oder Vortragsvideos. Nun pflegt er die elektronische Sammlung seiner Selbstzeugnisse, indem er alle Telefonate sowie mit einer **intelligenten Kamera sein Alltagsleben** aufzeichnet.

Das ist offenbar noch der einfache Teil. Eine echte Herausforderung für die Softwareforscher scheint es jedoch zu sein, in dem terabytestarken Datenwust noch irgendetwas von Bedeutung wiederzufinden. Und wie steht es mit der Sinnfrage? Wer würde wirklich sein »ganzes Leben« in fast allen mikroskopischen Details so protokolliert sehen wollen? Möchte unsereins überhaupt so viel über sich wissen? Und wie steht es mit Dingen, von denen man partout nicht will, dass sie festgehalten werden? Es muss ja nicht gleich um Kriminelles gehen! Aber dass Menschen aus freien Stücken **Orwells Big Brother** für sich selbst erschaffen, würde eine ungewöhnliche »freiwillige Selbstkontrolle« bedeuten. Andererseits kann ich mir vorstellen, dass jeder, der plant, einmal eine Autobiografie zu verfassen, lieber die Lebens-Festplatte konsultiert, als in alten Kartons auf dem Dachboden herumzukramen.

Offen gestanden bin ich mir nicht sicher, was ich von solchen Projekten halten soll. Wenn es die Möglichkeit gibt, werden Menschen auch davon Gebrauch machen. Und vielleicht entwickelt sich daraus einmal etwas Nützliches. Wer möchte, könnte dann ja seinen Avatar im »Second Life« mit seiner eigenen Biografie ausstatten. Was Sie davon halten, würde mich interessieren – schreiben Sie uns (www.spektrum.de/erinnerungtotal)!

Herzlich Ihr



> Durchstarten mit Tagesgeld PLUS

- 3,6 % Zinsen p.a. bis 30.000 Euro*
- Plus 25 Euro Startguthaben**
- Täglich verfügbar, flexibler als ein Sparbuch
- Kostenlose Kontoführung

* Zinssatz gilt p.a. und ist variabel.
** Ab 1.000 Euro Anlage. Nur für Neukunden.

www.comdirect.de oder
01803 - 44 45
(0,09 Euro/Min. aus dem Festnetz der T-Com)

BÖRSE ONLINE
1. Platz
Bestes klassisches Tagesgeld
comdirect
AUSGABE 12/2007

.comdirect
Ihr Geld kann mehr

INHALT

SPEKTROGRAMM

10 Denkende Ratten · Quasikristalline islamische Ornamente · Duftes Lernen im Schlaf · Salamander-Roboter u. a.

13 **Bild des Monats**
Eiskalte Spinne

FORSCHUNG AKTUELL

14 **Im Cockpit der Fliege**
Neue Details zur Flugsteuerung des Insekts

16 **Das kleinste Genom der Welt**
Wie zwei Mikroben mit ihrem Erbgut geizen

20 **Klima-Fernwirkung von Aerosolen**
Saharastaub und Smog über China ändern auch das Wetter in Europa

THEMEN

▶ **24** PSYCHOLOGIE
Verlegenheit – ein zweischneidiges Verhaltensmuster

▶ **34** TITELTHEMA ASTRONOMIE
Schwarze Löcher halten Galaxienhaufen in Schach

44 GENETIK
»Springende Gene« sind kein Müll

▶ **50** SCHWERPUNKT GALLIER
Ganz Gallien war besetzt!
Landkarte der Stämme
Senatoren und Könige
Gallier als Feindbild
Wie wahr ist Asterix?
Die Mär vom heiligen Hain

68 KLIMA
Pflanzen setzen Treibhausgas frei

76 PHYSIK
Rechnen mit Licht dank Siliziumlaser

▶ **84** DIGITALES GEDÄCHTNIS
Das eigene Leben als Datenbank

102 ESSAY
Darf man neue Medikamente am Menschen erproben?

SEITE 24

EMOTIONEN

Die Pein der Verlegenheit

Zum Betretensein gehören bestimmte Verhaltensmuster – die andere klar erkennen. Meist ist die Empfindung hilfreich, doch kann sie auch zu irrationalem Verhalten führen

SEITE 44

GENETIK

Evolution durch Schrott-DNA

Springende genetische Elemente, einst als gefährliche Zeitbomben und Informationsmüll verkannt, regulieren in Wahrheit das Zusammenspiel der Gene mit der Umwelt

SEITE 68

BOTANIK

Pflanzen, Methan und Klima

Jahrzehntelang wurde übersehen, dass Pflanzen das Treibhausgas Methan ausstoßen. Tragen sie eine Mitschuld am momentanen Klimawandel?

SEITE 50

SCHWERPUNKT

Caesars Gallien

Als gewitzte schnauzbärtige Krieger mit Flügelhelmen zeigen sie die Asterix-Comics. Als grausame Barbaren schilderten sie die Römer. Archäologen und Historiker wissen heute: Beide Darstellungen der Gallier sind nur Fiktion

TITELTHEMA ASTRONOMIE **SEITE 34**

Schwarze Löcher

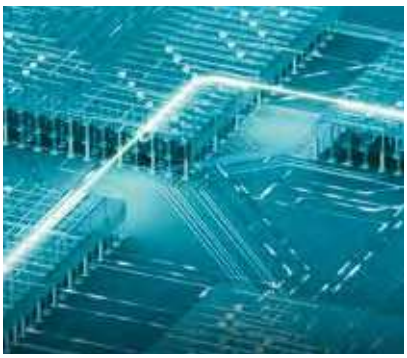
Kleiner als das Sonnensystem prägen sie dennoch das Schicksal riesiger Galaxienhaufen. Die Mahlströme heizen mit Gasstrahlen den Raum zwischen den Welteninseln auf und verhindern neue Sterngeburten

SEITE 76

PHYSIK

Laser aus Silizium

Endlich ist es gelungen, den gängigsten Halbleiter zum Aussenden von kohärentem Licht zu bewegen. Das verspricht Anwendungen für billige Sensorenetze und die ultraschnelle Datenübertragung



SEITE 84

DIGITALES GEDÄCHTNIS

Erinnerung total

Softwareforscher entwickeln Systeme, mit denen jeder seine sämtlichen Dokumente und sogar sein Alltagsleben aufzeichnen und in einem durchsuchbaren Archiv bereithalten kann

KOMMENTAR

22 SPRINGERS EINWÜRFE
Freudiges Erinnern, gnädiges Vergessen

WISSENSCHAFT IM ...

42 **Rückblick:** Atomfriseur · Schluckimpfung gegen Polio · Geheimfotos mit Taschenuhr · Wetterprognosen u. a.

74 **Alltag:** Elektronische Schutzengel – Fahrerassistenzsysteme

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

94 **Brennkurven und das Porzellan:** Kaustiken finden sich in den überraschendsten Zusammenhängen

REZENSIONEN

97 **Allmächtiger!** von Eckhard Schwettmann
Denksport Physik von Lewis C. Epstein
Leonhard Euler von Andreas K. Heyne, Alice K. Heyne und Elena S. Pini
Lexikon der Krankheiten und Untersuchungen
Mission X von Günter Myrell und Daniel Manthey (Hg.)

WEITERE RUBRIKEN

3 **Editorial**
Leben in der Parallelwelt

8 **Leserbriefe**

9 **Impressum**

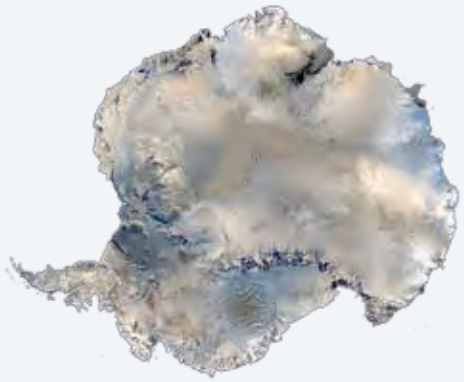
101 **Preisrätsel**

106 **Vorschau**

Titelillustration: Don Dixon

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Spektrum ONLINE



◀ POLARJAHR 2007/2008

Forschung in Arktis und Antarktis im Fokus

Gletscherschwund auf Grönland, Eisbären ohne Heimat, Rekordwärme auf Spitzbergen oder Seenketten unter antarktischem Eis – Arktis und Antarktis machten in letzter Zeit Schlagzeilen. Aber noch immer klaffen viele Lücken im wissenschaftlichen Verständnis des nicht mehr ganz so ewigen Eises. Das groß angelegte Internationale Polarjahr 2007/2008 soll zumindest einige davon nun schließen www.spektrumdirekt.de/polarjahr

◀ SPEICHERUNG DES GANZEN LEBENS

Wollt ihr das totale Gedächtnis?

Es wäre doch schön, wenn man längst Vergessenes detailliert und in Farbe wieder gegenwärtig machen könnte: die Schulzeit, alte Bekannte, den ersten großen Auftritt … Es wäre auch hilfreich, minutengenau nachgewiesen zu bekommen, wie viel Zeit man mit dem Konsum ungesunder Fette und im Gespräch mit unwichtigen Mitmenschen verplempert. Technisch wird das bald machbar sein (siehe S. 84); aber wollen Sie es wirklich so genau wissen? Ihre Meinung interessiert uns! www.spektrum.de/erinnerungtotal

5x5 Die Rezension des Monats von spektrumdirekt

	1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■ ■ ■ ■ ■
Didaktik	■ ■ ■ ■ ■
Suchen/Finden	■ ■ ■ ■ ■
Lesespaß	■ ■ ■ ■ ■
Preis/Leistung	■ ■ ■ ■ ■
Gesamtpunktzahl	25

◀ REZENSION

Eva-Maria Dreyer:
Wildkräuter und ihre giftigen Doppelgänger

In diesem preisgünstigen und handlichen Büchlein lernt man rund neunzig genießbare einheimische Kräuter kennen und erfährt vor allem, wie sie sich von giftigen oder ungenießbaren Doppelgängern unterscheiden *Aus der Rezension von Sabine Knapp*

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen finden Sie unter www.spektrumdirekt.de/5x5

◀ SPEKTRUM-PLUS: ZUSATZANGEBOT FÜR ABONNENTEN

Strom gewinnen, Geschichte verlieren

Ein gigantischer Damm soll den Nil im Sudan aufstauen. Er wird eine Region versinken lassen, die zu Unrecht wie ein Hinterhof der Geschichte wirkt. Und er dürfte dem Volk der Manasir die Kultur rauben

Dieser Artikel ist für Abonnenten frei zugänglich unter www.spektrum-plus.de

Sie suchen einen Artikel aus einem früheren Heft von Spektrum der Wissenschaft?

Geben Sie auf www.spektrum.de einen oder mehrere charakteristische Begriffe in das Feld »Suche Artikel« ein, wählen Sie unter »Archiv« das gewünschte Heft oder geben Sie dort einen Suchbegriff ein. Alle Artikel ab Januar 1993 sind abrufbar; für Abonnenten kostenlos

PUBLIKATIONEN

zu Themen
in diesem Heft

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 34

ASTRONOMIE

Das Schwarze Loch im galaktischen Zentrum

Da Andromedanebel und Milchstraße sich aufeinander zubewegen, könnte das Schwarze Loch unserer Galaxis dereinst neue Nahrung erhalten

SUW SPECIAL 1/2006
Unsere kosmische Heimat

Kreislauf der Materie

Vom Kometenring zur Welteninsel

Dunkle Materie

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 44

GENETIK

Das verkannte Genom-Programm

Liegt der Schlüssel zum Verständnis von Embryonalentwicklung und Evolution in einem erst wenig erforschten Regulationssystem?

SDW DOSSIER 1/2006
Das neue Genom

Zensur in der Zelle

Raffinierter genetischer Code

DNA ist nicht alles

Menschenrassen

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 76

ERFINDUNGEN

Einstein im Alltag

Sie navigieren mit Hilfe des globalen Positionierungssystems? Sie benutzen beim Aufhängen eines Bilds eine Laser-Wasserwage? Sie machen Fotokopien? Danken Sie Einstein!
www.spektrum.de/artikel/849228

SDW SPEZIAL 1/2006
Einstein und die Folgen

Das Wunder von Bern

Schneller als Licht?

Die verfilmte Relativität

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 50

KELTEN

Mistelkult und Jenseitswelt

In einem Staat waren sie nie geeint. Doch das große Volk der Kelten hatte gemeinsame religiöse Vorstellungen, die – dank der gallischen Barden – bis in unsere Zeiten überdauerten

ABA 4/2006
Abenteuer Archäologie

Troja: Vor den Toren der Burg

Das galante Rom

Römische Adler im Druidenland

Diesen Artikel finden Sie als kostenlose Leseprobe im Internet. Unsere Sonder- und Monatshefte sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon: 06221 9126-743

Standards brauchen freie Systeme

Roboter für jedermann, März 2007

Ich bin, gelinde gesagt, erstaunt darüber, dass Sie Bill Gates im redaktionellen Teil Werberaum zur Verfügung stellen. Ausgerechnet der Gründer der Firma, die sich durch kontinuierliches Agieren gegen offene Standards auszeichnet, darf dann über fehlende Standards lamentieren. Das Editorial assistiert: »Lediglich fehlende Standards beim Betriebssystem« beklage Gates.

Soll heißen: Nehmt doch das von Microsoft. Diese Firma kennt nur proprietäre Produkte, die andere von der Nutzung ausschließen. Echte Standards werden regelmäßig »ergänzt«, bis per Marktmacht das Diktat erreicht ist. Die EU-Kommission hat dieses Verhalten zu Recht mit einer Strafe belegt. Standards verdienen den Namen nur, wenn sie offen und transparent sind. Das erfordert die Offenlegung der Referenzimplementationen. Nur freie Open Source Software kann das gewährleisten. Roboter für jedermann gibt es nur mit einem offenen Betriebssystem für jeden, das offene Standards implementiert – GNU/Linux ist sein Name.

Dr. Stefan Meretz, Berlin

Erst allgemeine Prinzipien festlegen

Bill Gates will Heimcomputern Beine machen, Editorial, März 2007

Wenn ich mir vorstelle, dass Roboter (oder allgemeiner: Haushaltsmaschinen) mit Software aus dem Hause Microsoft betrieben werden soll(t)en, wird mir jetzt schon ganz anders. Mit den üblichen Sicherheitslücken ausgestattet – wozu lässt sich dann zum Beispiel ein Küchenroboter missbrauchen? Oder die andere Seite: Welche persönlichen Daten landen dann wo? Und vielleicht sollte man auch eines Herrn Asimov gedenken (Robotergesetze in der Art »Ein Roboter darf keinem Menschen (Wesen) schaden …«).

Bevor Roboter geschaffen werden, sollten erst einmal die allgemeinen Prinzipien festgelegt werden, unter denen sie arbeiten – unabhängig von Staat und Industrie!

Rolf Wroblewski, Bremen

NATIONAL PARK SERVICE, USA

Nach einer neuen Theorie kam es zu Massenextinktionen, weil sich komplette Ozeane in stinkende Kloaken verwandelten – ähnlich dieser heißen Schwefelquelle.

Blick geöffnet

Wyatt-Earp-Effekt, Essay, März 2007

Gefühl und Intuition haben mich bei manchen Entscheidungsprozessen geleitet. Und oft entwickelten sich nach diesen Entscheidungen, wie es sich später herausstellte, positive Prozesse. Thomas Bruss öffnete mir durch seine Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen exzellent den Blick auf die eigentlichen Hintergründe für Entscheidungen. Nebenbei erkannte ich, dass mir eine gehörige Portion Glück in meinen Entscheidungen zur Seite gestanden hat. Oder war das Glück letztendlich doch nur wieder »normalverteilt«?

Bernhard Dincher, Bremen

Kein Paradigmenwechsel

Tod aus der Tiefe, März 2007

Wo noch vor Jahren die Meinung vorherrschte, dass zumeist kosmische Einschläge für die Massenextinktionen verantwortlich gewesen seien, rücken heute irdische Mechanismen in den Vordergrund, was Ward veranlasst, von einem »Paradigmenwechsel« zu sprechen.

Man sollte jedoch im Kontext der empirischen Wissenschaften nicht von Paradigmen und erst recht nicht von Paradigmenwechseln (Zitat aus dem Artikel: »Revolutionen, bei denen eine allgemein anerkannte Theorie plötzlich durch ein neues ›Paradigma‹ ersetzt wird«) sprechen, weil die Verhältnisse in der Wissenschaft damit stark verzerrt wiedergegeben werden. Diese auf den Philosophen Thomas Kuhn zurückgehende Vorstellung erweckt beim Laien die Idee, die wissenschaftlichen Theorien seien beliebig: Alle paar Dekaden wird ja sowieso alles umgeworfen und das, was vorher »richtig« war, ist nun »falsch« – eben bis zum nächsten Paradigmenwechsel.

Doch sind die »Revolutionen« bei Weitem nicht so revolutionär, wie sie scheinen. Durch die Wellenoptik wurde die Strahlenoptik nicht falsch, sondern verfeinert, genauso wie die Quantenoptik eine höhere Differenzierung und Verallgemeinerungsstufe darstellt als die Wellenoptik.

Das Gleiche gilt für die Massenextinktionen: Wie Ward selbst betont, gibt es an der Einschlagstheorie zur Kreide-Tertiär-Grenze nichts zu rütteln – kein Paradigmenwechsel weit und breit! Lediglich die Idee, dass es ein einziger Grund gewesen sei, der (fast) immer für diese katastrophalen Ereignisse verantwortlich war, muss wohl revidiert werden. Wieder einmal wird ein Theoriengebäude verbessert und verfeinert, dabei aber mitnichten umgeworfen.

Dr. Andreas Beyer, Essen

Erneuerbare Energie in aller Munde

Schöne Grüße von Vulcanus, Wissenschaft im Alltag, Februar 2007

Sie haben bereits mehrmals den Begriff »erneuerbare Energie« verwendet. Energie, das Arbeitsvermögen eines physikalischen Systems, kann nicht erneuert, sondern lediglich von einer Form in eine andere umgewandelt werden.

Auch wenn in den Medien, in der Politik, sogar im Bundesgesetzblatt dieses »Unwort« Einzug gehalten hat, sollte in »Spektrum der Wissenschaft« auch weiterhin seine Brillanz bezüglich Inhalt und Formulierung im Vordergrund stehen.

Dipl.-Ing. Horst Engelmann, Bochum

Ist Hirnforschung geistfeindlich?

Vom Glauben zum Wissen und zurück, Essay, Januar 2007

Bei dem vom Autor betonten besonderen Widerstand gegen die Hirnforschung wird stets die angebliche Inkompetenz von Naturwissenschaftlern in Fragen des Leib-Seele-Problems behauptet. Der »Leib-Anteil« dieses Problemkomplexes erhält aber erst jetzt mit der modernen Neurobiologie einen kompetenten Sachvertreter. Das hinderte bekanntlich nicht, diesen Anteil als nur materiell und daher ontologisch unwesentlich zu disqualifizieren. Heute kann das Problem neu diskutiert werden und die Naturwissenschaft muss dabei als Anwalt für den bisher so verteufelten Leib auftreten dürfen.

Dr. Armin Tippe, Schwabhausen

Arbeit eines Papyrologen

Das Papier der Antike, Januar 2007

Dieser Artikel hat mir ausgesprochen gut gefallen. Es wurden nicht nur Ergebnisse präsentiert, sondern Joachim Latacz hat es sehr gut verstanden, die oft mühevolle Arbeit eines Papyrologen auch im scheinbar banalen Detail anschaulich zu beschreiben.

Martin Rautenberg, Dortmund

Programm und Entwurf

Neue Wege zu sicherer Software Januar 2007

Der Artikel fällt in die Kategorie: Die Welt ist zwar komplex und voller Probleme, aber ich habe das Allheilmittel gefunden. Seit über 30 Jahren ist dieses Phänomen in der Informatik bekannt.

Damals hatte Tony Hoare, ein Engländer, die Idee, dass man nur Zusicherungen zu schreiben braucht, die ein Programm erfüllen muss, dann kann man mechanisch beweisen, ob es korrekt ist oder nicht. Leider stimmt dies nur, wenn man den Korrektheitsbegriff entsprechend einschränkt. Man sagt einfach, dass ein Programm immer dann korrekt ist, wenn zwei formale Beschreibungen desselben konsistent sind. Damals erfolgte der Nachweis dieser Konsistenz durch die Reduktion logischer Formeln, heute benutzt man dafür eine Art von Simulation.

Die Unterscheidung zwischen Programm und Entwurf besteht oft nur darin, dass der Entwurf in einer anderen formalen Sprache ausgedrückt wird als das Programm selbst. Bezüglich eines nicht formal, also nicht exakt beschriebenen Entwurfs lassen sich nämlich keine formalen Prüfungen anstellen.

Prof. Dr. Albert Endres, Sindelfingen

Errata

Wolkige Projektionen, April 2007

Im Diagramm auf S. 29 sollte als erste Jahreszahl links unten an der Abszisse 1700 statt 70 stehen.

Schönheit der Moleküle, März 2007

Die gefalteten inneren Membranen der Mitochondrien haben im Schnittpräparat ein zackenartiges Aussehen und heißen deshalb *Cristae* nach dem lateinischen Wort für Kamm und nicht Christae.

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief direkt in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit Ihrer vollständigen Adresse an:
Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Götz Hoeppe, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann (Online Coordinator), Ursula Wessels; Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Werner Gans, Doris Gerstner, Angelika Hildebrandt, Henning Hollborn, Dr. Rainer Kayser, Dr. Achim Schneider, Maria-Julia Weber.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls;
Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005;
Hamburg: Siegfried Sippel, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283;
Düsseldorf: Hartmut Brendt, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2062, Fax 0211 887-2099;
Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55;
Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49;
München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 28a vom 01. 01. 2007.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

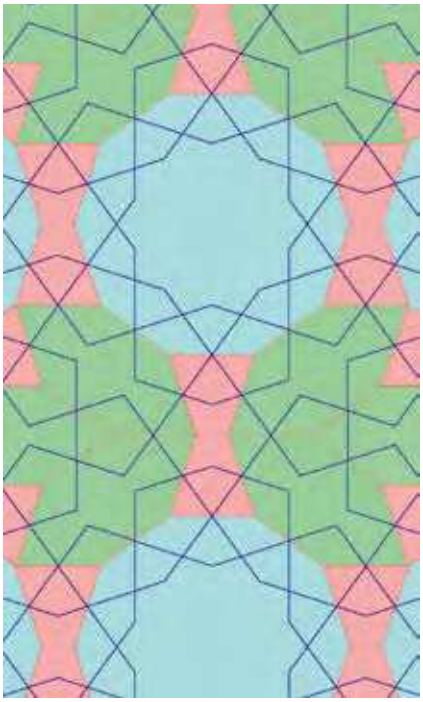
Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2007 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Brian Napack, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/ Managing Director, International: Dean Sanderson

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel



BEIDE ABBILDUNGEN: W. B. DENNY

MATHEMATIK

Quasikristalline islamische Muster

Keine noch so ausgefallene Badezimmerwand enthält fünfeckige Kacheln. Der Grund ist einfach: Mit derart »schrägen« Fliesen lässt sich keine Fläche durch reihenweises Aneinanderlegen lückenlos bedecken. Erst 1974 bewies Roger Penrose, dass es mit zwei Sorten von Kacheln gelingt, Parkettierungen mit fünfzähliger Drehsymmetrie zu erzeugen. Diese fand man später in so genannten Quasikristallen wieder. ▸

Das Girih-Muster (links) aus der Grünen Moschee von 1424 in Bursa (Türkei) lässt sich mit drei Kachelsorten – Zehneck (blau), Sechseck (grün) und »Fliege« (rosa) – reproduzieren (rechts).

ARCHÄOLOGIE

Magisches künstliches Auge

Vielleicht war es nur eine Prothese. Vermutlich aber diente das Kunstauge, das Lorenzo Costantini vom Istituto Italiano per l'Africa e l'Oriente in Rom zusammen mit persischen Kollegen jetzt in der bekannten Ausgrabungsstätte Shahr i-Sokhta im südöstlichen Iran entdeckten, als Zeichen für hellseherische Fähigkeiten oder den Priesterinnenstatus. Die schwarze Halbkugel, die aus einer Art Bitumen besteht, war in die Augenhöhle eines Frauenskeletts eingepasst. Einst mit Gold ausgelegte radiale Rillen – Reste des Edelmetalls haften noch darin – erwecken den Eindruck eines Strahlenkranzes. Außerdem sind um die Pupille herum parallele Linien in Form ineinandergeschachtelter Rauten eingekerbt, die einen Diamanten darstellen dürften.

Zur Befestigung des künstlichen Auges dienten zwei kleine, an den Seiten gebohrte Löcher, an die wohl ehemals ein Faden geknotet war. Wie erhaltene Gewebespuren im Innern der Halbkugel nahelegen, hatte sich vom langjährigen Tragen anscheinend ein Abszess am Augenlid gebildet.

Die Frau war bei ihrem Tod vor 4800 Jahren zwischen 25 und 30 Jahre alt. Sie stammte, nach den Gesichtszügen zu urteilen, möglicherweise aus Arabien. Mit 1,80 Meter muss sie für die damalige Zeit ungewöhnlich groß gewesen sein. Ihre Todesursache ist unbekannt.

Gespenstisch mutet das Kunstauge aus schwarzem Bitumen im Schädel einer bronzezeitlichen Frau an.

Pressemitteilung der Cultural Heritage News Agency

MANSUR SAJJADI

VERHALTEN

Denkende Ratten

»Ich weiß, dass ich nichts weiß.« Zu dieser Einsicht des Philosophen Sokrates sind offenbar auch Ratten fähig. Das fanden nun Allison Foote und Jonathon Crystal von der University of Georgia in Athens heraus. Die Forscher brachten den Tieren zunächst bei, Töne durch das Drücken verschiedener Knöpfe nach ihrer Dauer als kurz (weniger als 3,6 Sekunden) oder lang (mehr als 4,4 Sekunden) zu klassifizieren. Bei der richtigen Antwort erhielten die Ratten eine extragroße Portion Futter als Belohnung, bei der falschen gingen sie leer aus. Zudem bestand die Möglichkeit, einen »Weiß nicht«-Knopf zu drücken. In diesem Fall gab es immerhin einen kleinen Happen.

Im anschließenden Versuch verhielten sich die Tiere dann höchst gewitzt: Kamen sehr kurze oder sehr lange Töne, antworteten sie bereitwillig. Bei mittlerer Dauer gingen sie dagegen meist auf Nummer sicher, bekundeten Unwissen und kassierten die kleinere Belohnung. Wurden sie jedoch zu einer Entscheidung gezwungen, lagen sie öfter daneben als Artgenossen, die freiwillig eine Antwort auf die schwierige Frage gegeben hatten. Nach Ansicht von Foote und Crystal beweist das eine Fähigkeit zur Metakognition, die Biologen bisher allenfalls Primaten zugebilligt hatten.

Current Biology, Online-Vorabpublikation vom 8. 3. 2007

▸ Nun haben Peter Lu von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) und Paul Steinhardt von der Universität Princeton (New Jersey) festgestellt, dass mittelalterliche islamische Ornamente offenbar auf analoge Weise konstruiert wurden. Diese »Girihs« sind komplexe flächenfüllende geometrische Muster, die teils Objekte mit fünf- oder zehnzähliger Drehsymmetrie enthalten. Sie mit Lineal und Winkelmesser fehlerfrei zu zeichnen, wie bisher gedacht, wäre extrem schwierig gewesen. Wie Lu und Steinhardt nun herausfanden, lassen sie sich jedoch ausnahmslos aus maximal fünf Kacheln konstruieren: einem Fünf-, Sechs- und Zehneck sowie einem Rhombus und einer »Fliege«. Deren Seiten sind allesamt gleich lang, und die Linien der Ornamente verlaufen durch die Seitenmitten. Um ein fehlerfreies Girih zu erhalten, mussten die islamischen Baumeister nur einfach Kachel an Kachel legen.

Science, 23. 2. 2007, S. 1106

Ratten gelten nicht als große Denker, aber auch sie wissen, was sie können und was nicht.

DOT PAUL, UNIVERSITY OF GEORGIA

A. HERZOG, BIOLOGICALLY INSPIRED ROBOTICS GROUP (BIRG), EPFL

Der Salamander-Roboter kann wie sein lebendes Vorbild sowohl schwimmen als auch laufen.

BIOMECHANIK

Wie die Fische laufen lernten

Der Ursprung des Lebens lag im Meer. Erst vor rund 400 Millionen Jahren wagten sich die ersten Wirbeltiere an Land. Diese amphibischen Zwitterwesen waren noch in beiden Welten zu Hause: Im Wasser konnten sie schwimmen, auf dem Trockenen dagegen mit ihren Flossen, die allmählich zu Beinen wurden, vorwärtsrobben. Doch wie wechselte ihr Gehirn zwischen beiden Bewegungsarten? Dem ging ein Team um Auke Jan Ijspeert von der Technischen Hochschule Lausanne nach, indem es ein neuronales Verschaltungsmuster entwarf, das den Wechsel auf sehr einfache Art ermöglicht. Das Ergebnis testeten die Forscher an einem Roboter, der sich wie ein Salamander im Wasser durch schnelles Schlängeln fortbewegt, an Land dagegen eher gemächlich daherwatschelt.

Dieser Geschwindigkeitsunterschied ist entscheidend. Im Modell reagieren die Beine auf langsame rhythmische Signale aus dem neuronalen Steuerzentrum. Dabei hemmen sie zugleich über eine Rückkopplungsschleife die Aktuatoren für die schlängelnde Schwimmbewegung. Mit steigender Signalfrequenz können sie dem Rhythmus aber nicht mehr folgen und halten an. Dadurch entfällt die Hemmwirkung auf die Schlängelaktuatoren. Diese beginnen nun mit der hohen Frequenz zu oszillieren: Der Roboter wechselt vom Watscheln zum Schwimmen. Das Umschalten zwischen beiden Bewegungsarten geschieht also allein über die Signalfrequenz.

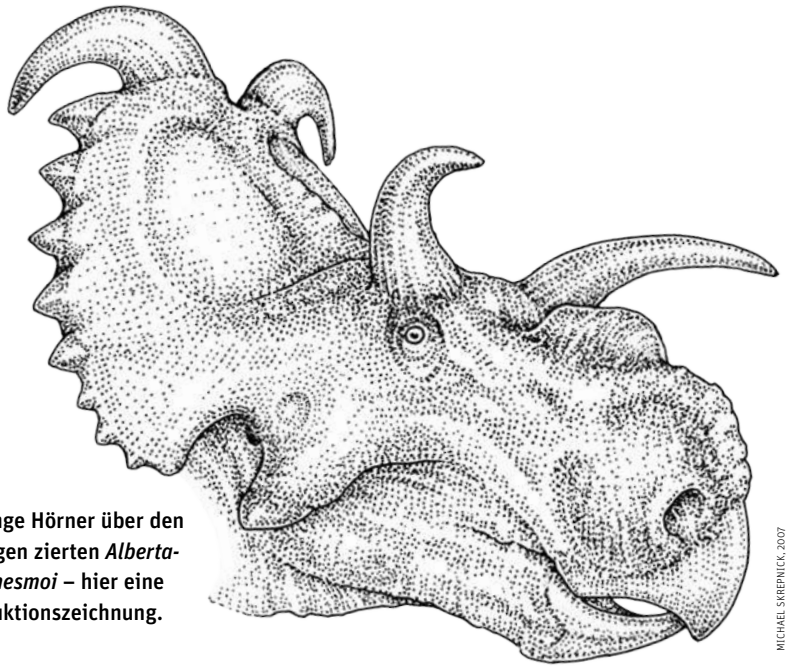
Science, 9. 3. 2007, S. 1333

PALÄONTOLOGIE

Neuer gehörnter Dinosaurier

In die Wissenschaft einzugehen und damit unsterblich zu werden, ist nicht so einfach. Der kanadische Farmer Cecil Nesmo hat es nun geschafft: Ein neu entdeckter Dinosaurier trägt seinen Namen. Diese Ehrung hat sich der Landwirt redlich verdient – mit tatkräftiger Hilfe beim Aufspüren und Bergen des Fossils auf seiner entlegenen Farm im kanadischen Bundesstaat Alberta.

Albertaceratops nesmoi, wie die zuvor unbekannte Dinosaurierart heißt, zeichnet sich durch mehr als einen Meter lange Hörner über den Augenbrauen aus. Innerhalb der Gruppe der Centrosaurinae ist das Tier damit einzigartig. Seine nächsten Verwandten trugen alle nur kleine Hörner über den Augen und dafür ein längeres Exemplar auf der Nase sowie mehrere Stacheln oder Haken am Schädel.



MICHAEL SKREPNICK, 2007

Lange Hörner über den Augen zierten *Albertaceratops nesmoi* – hier eine Rekonstruktionszeichnung.

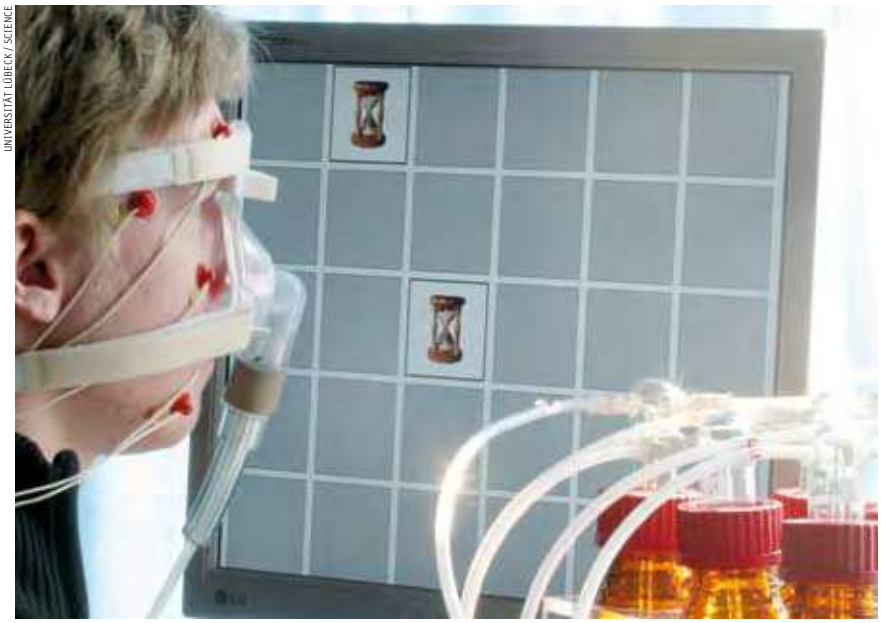
Wie der Paläontologe Michael J. Ryan vom Naturkundemuseum Cleveland meint, hätte der Kopfschmuck von *A. nesmoi* eher zu einem *Triceratops* gepasst. Auch der präsentierte sich mit langen Hörnern über den Augen, lebte allerdings erst rund 10 Millionen Jahre später am Ende der Kreidezeit.

A. nesmoi war etwa sechs Meter lang und wog ungefähr fünf Tonnen. Wozu er seine riesigen Hörner benötigte, ist nicht klar. Vermutlich dienten sie entweder zur Verteidigung gegen Fressfeinde oder zum Kampf gegen Rivalen.

Journal of Palaeontolgy, Bd. 81, Nr. 2, S. 376

HIRNFORSCHUNG

Duftes Lernen im Schlaf



UNIVERSITÄT LÜBECK / SCIENCE

Ein Versuchsteilnehmer merkt sich Bildpaare am Computerschirm, während er per Atemmaske Rosenduft riecht.

Rote Rosen regnen sollte es für Studenten oder Schüler, die sich viel merken müssen. Wie Björn Rasch von der Universität Lübeck und seine Kollegen herausfanden, fördern Gerüche nämlich das Lernen im Schlaf. In ihrem Experiment mussten sich 18 männliche und weibliche Probanden in einer Art Memory-Spiel am Computer Bildpaare einprägen, während sie Rosenduft schnupperten. Beim Schlafen in der folgenden Nacht präsentierten die Versuchsleiter einigen von ihnen dann erneut das Odeur, während andere ein geruchsloses Gas einatmeten.

Am Morgen danach zeigte sich der Unterschied: Mit 97 Prozent der Bildpaare hatten die nächtens mit Rosen(duft) Bedachten deutlich mehr im Gedächtnis behalten als Angehörige der Kontrollgruppe, die sich lediglich an 86 Prozent der Informationen vom Vortag erinnerten. Genauere Untersuchungen zeigten, dass der Geruch in der Tiefschlafphase während der ersten Nachtstunden präsentiert werden muss; danach bleibt er wirkungslos.

Nach Ansicht der Forscher unterstützt der Duft den Hippocampus, der im Gehirn für die Gedächtnisbildung zuständig ist, beim Reaktivieren und Verfestigen der Erinnerungen vom Vortag während der Tiefschlafphase. Das erneute Schnuppern des bekannten Geruchs erleichtert dabei offenbar das neuerliche Aufrufen mit ihm assoziierter Gedächtnisinhalte.

Science, 9. 3. 2007, S. 1426

Mitarbeit: S. Hügler, A. Römer und I. Wahl

PABLO J. LÓPEZ-GONZÁLEZ / ALFRED WEGENER INSTITUT FÜR POLAR- UND MEERESFORSCHUNG

Eiskalte Spinne

Das Leben im Meer unter den riesigen Schelfeisflächen der Antarktis ließ sich bisher nur sporadisch durch Bohrlöcher erkunden. Der Abbruch der Eisschelfe Larson A und B in den letzten Jahren erlaubt jedoch erstmals umfassende Einblicke in dieses kaum bekannte Ökosystem. Bei der jüngsten Expedition des Forschungsschiffs Polarstern an den Südpol nutzten Wissenschaftler im Rahmen des internationalen Projekts »Census of Marine Life« die Chance für eine Bestandsaufnahme und registrierten zugleich erste Veränderungen nach dem Verschwinden der Eisdecke. Insgesamt dokumentierten sie etwa tausend Tierarten, viele davon fremdartig. Einige Spezies wie diese Antarktische Seespinne – die Aufnahme zeigt ein Eier tragendes Männchen – waren nach einer vorläufigen Beurteilung zuvor nicht bekannt.

NEUROBIOLOGIE

Im Cockpit der Fliege

Wenn eine Fliege umherschwirrt, zieht ihre Umwelt an ihren Augen vorbei. Wie ein einzelnes Neuron aus diesem »optischen Flussfeld« Informationen über eine horizontale Drehung extrahiert, ließ sich nun im Detail klären.

Von Katrin Weigmann

Sehen ist keine passive Tätigkeit – weder bei uns Menschen noch bei der Fliege. Damit wir etwas sehen können, tasten wir unsere Umgebung mit sprunghaften Augenbewegungen ab. Drei bis fünf solcher »Sakkaden« macht das Auge in der Sekunde; dazwischen ruht der Blick auf einem Bildpunkt. Ähnliches gilt auch für die Schmeißfliege *(Calliphora vicina)*. Allerdings kann sie ihre völlig anders aufgebauten Komplexaugen nicht unabhängig vom Rest des Körpers bewegen. Deshalb dreht sie den Kopf oder ändert beim Umherschwirren immer wieder ruckartig die Richtung.

Das Insekt ist bei seinen rasanten Flugmanövern auf eine visuelle Rückkopplung angewiesen. Die Information dafür liefern so genannte optische Flussfelder. Betrachten wir zum Beispiel eine Fliege, die von einer Unterlage abhebt. Für sie bewegt sich die Umgebung insgesamt nach unten. Weicht das Tier vor einem Gegenstand nach links aus, schwenkt dieser nach rechts. Dreht es sich um seine eigene Körperachse, rotiert die Welt vor seinen Augen.

Aus diesen optischen Reizen erschließt die Fliege ihre eigene Bewegung im Raum. Erstaunlich ist, dass sie dazu nur wenige hundert Neuronen benötigt. Wie diese verschaltet sind, um die komplizierte Aufgabe zu bewältigen, untersucht seit vielen Jahren Alexander Borst vom Max-Planck-Institut für Neurobiologie in Martinsried bei München mit seiner Abteilung.

Schon länger weiß man, dass bestimmte Neuronen gezielt Bewegungen des gesamten Gesichtsfelds der Fliege erfassen. Sie haben verzweigte Fortsätze, mit denen sie Informationen aus verschiedenen Bereichen des Komplexauges erhalten. Einige dieser Neuronen vergleichen dabei Reize entlang der horizontalen Achse des Sehorgans, während andere die vertikale Achse abtasten. Dadurch können sie Verschiebungen in der jeweiligen Richtung feststellen.

All diese bewegungssensitiven Neuronen sind derart miteinander verschaltet, dass die visuelle Information in mehreren Stufen analysiert wird. Am Ende der Verschaltungskette stehen dann Nervenzellen, in denen das gesamte Bewegungsrepertoire der Fliege kodiert ist. Einige reagieren zum Beispiel speziell auf den Geradeausflug, andere nur auf ganz bestimmte Drehbewegungen.

Angesichts der geringen Größe des Fliegenhirns muss der Schaltplan, der zu einer solchen Spezifität führt, sehr einfach sein. Wie Borst und seine Kollegen schon vor zwei Jahren gezeigt haben, liegt das Geheimnis dieser Einfachheit in einer besonderen Form von neuronalen Kontakten. Normalerweise wird das elektrische Signal einer Nervenzelle über so genannte Synapsen an nachgeschaltete Neuronen weitergeleitet, wobei ein chemischer Botenstoff als Übermittler fungiert. Die bewegungssensitiven Neuronen der Fliege sind dagegen teilweise elektrisch miteinander gekoppelt und können so Informationen direkt austauschen – ohne den Umweg über einen chemischen Zwischenträger. Wie das zu einer sehr effizienten Verschal-

Auf diesem Blick in das Gehirn einer Fliege sind zwei bewegungssensitive Nervenzellen mit ihren verästelten Fortsätzen durch fluoreszierende Farbstoffe sichtbar gemacht.

JÜRGEN HAAG, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR NEUROBIOLOGIE, MARTINSRIED

tung führt, haben Borst und seine Kollegen Karl Farrow und Jürgen Haag nun an einem horizontalen Neuron namens H2 exemplarisch gezeigt *(Nature Neuroscience, Bd. 9, S. 1312)*.

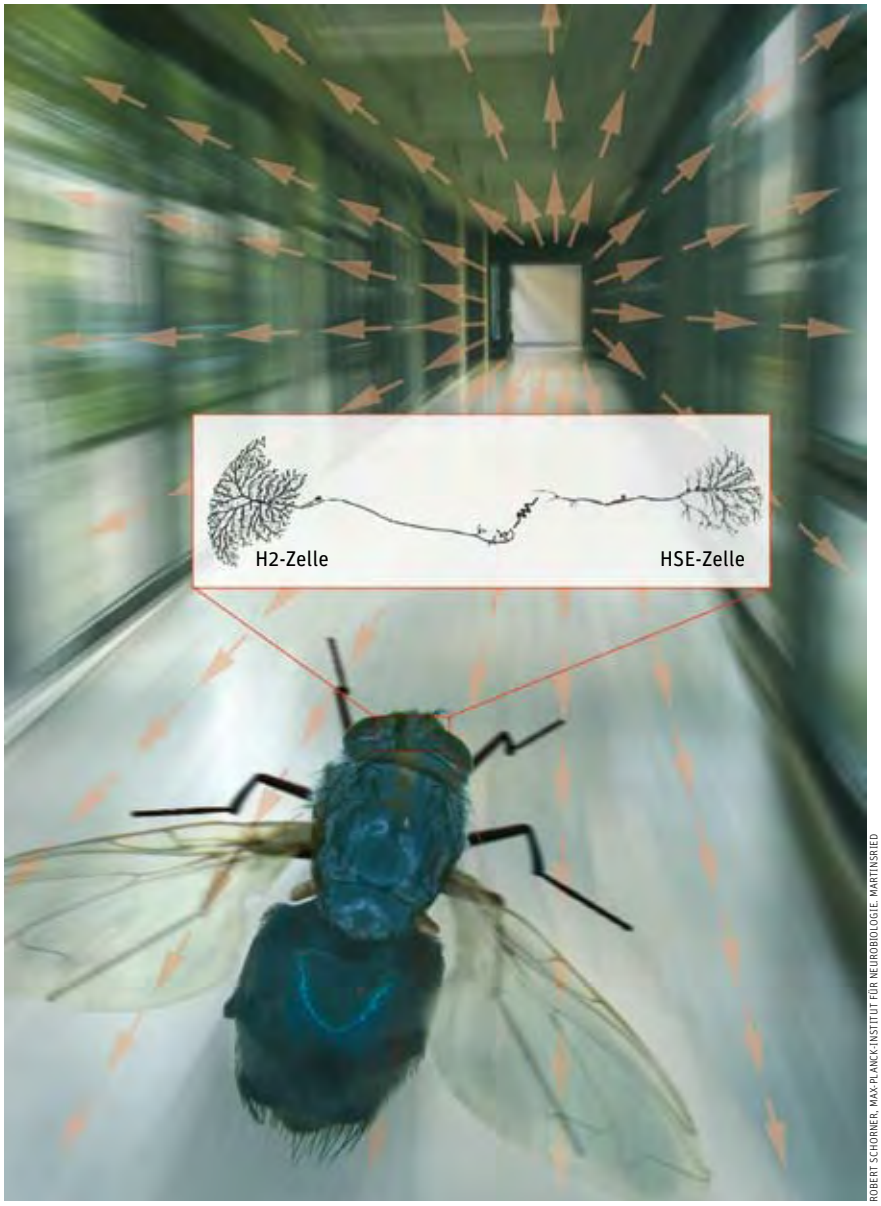
Von dieser Nervenzelle gibt es nur zwei Exemplare, eines in jeder Gehirnhälfte. H2 reagiert auf Bewegungen von hinten nach vorne im Auge der gleichen Körperseite. Solch ein Bewegungsmuster kann auf zweierlei Weise entstehen: wenn die Fliege durch den Wind rückwärtsgetragen wird oder wenn sie sich horizontal dreht. Zwischen den beiden Möglichkeiten vermag die H2-Zelle zu unterscheiden, indem sie Informationen aus dem gegenüberliegenden Auge hinzuzieht. Sieht dieses ebenfalls eine Bewegung von hinten nach vorne – wie beim Rückwärtsflug –, wird das Neuron gehemmt. Zieht die Umgebung aber in entgegengesetzter Richtung vor ihm vorbei, was der Fall ist, wenn sich die Fliege dreht, reagiert H2 besonders stark.

Nichtlineares Antwortverhalten

Wie aber bekommt es die Information von der anderen Seite? H2 ist über chemische Synapsen mit einer so genannten CH-Zelle im gegenüberliegenden Auge verbunden. In ihr vermuteten die Forscher deshalb die Informationsquelle. Doch als sie die CH-Zelle zerstörten, hatte das keine Auswirkungen auf das Verhalten von H2. Das Team um Borst suchte deshalb nach einer alternativen Verschaltung. Dabei entdeckte es, dass H2 zusätzlich an eine bewegungssensitive Zelle namens HSE im gegenüberliegenden Auge gekoppelt ist – und zwar elektrisch. Könnte von dort die Information über die Bewegung der Umwelt in der anderen Gesichtshälfte stammen? Die Forscher machten die Probe aufs Exempel und schalteten die HSE-Zelle ab. Diesmal zeigte sich der erhoffte Effekt: H2 verlor seine Drehselektivität.

Warum also HSE und nicht die CH-Zelle? »Darüber kann man nur spekulieren«, sagt Borst. »Vielleicht liegt es daran, dass es so einfach ist. Noch nie ist mir ein so einfacher Mechanismus begegnet.« Normalerweise kodieren Neuronen Informationen durch kurze elektrische Impulse, die sie wie Morsezeichen an die nachgeschaltete Zelle weitergeben. Wenn diese genügend solcher Signale empfängt, sendet sie selbst einen Impuls aus. Ihre Aktivität wird also durch die Summe ihrer Eingangssignale bestimmt.

Nicht so bei H2. Auf Reize aus dem gleichseitigen Auge allein reagiert die Zelle schwach, auf solche vom gegenüberliegenden Auge allein überhaupt nicht. Doch wenn beide zusammenkommen, spricht sie maximal an. »Die Ant- ▷



ROBERT SCHORNER, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR NEUROBIOLOGIE, MARTINSRIED

Wenn eine Fliege einen Korridor entlangfliegt, gleitet die Umgebung an ihren Augen vorbei (durch Pfeile illustriert). Aus diesem »optischen Flussfeld« errechnen höhere Verschaltungsebenen des Sehzentrums die Eigenbewegung des Insekts. Die so genannte H2-Zelle (links) erkennt dabei durch die direkte Verschaltung mit einem anderen Neuron namens HSE (rechts) im gegenüberliegenden Auge beispielsweise eine horizontale Drehung.

▷ wort auf die Summe der Reize ist nicht gleich der Summe der Antworten auf die Einzelreize«, erklärt Borst. Das Neuron verhält sich also nichtlinear, wie Wissenschaftler sagen. Dadurch reagiert es selektiver auf Drehreize, als der oben geschilderte normale Mechanismus das zulassen würde.

Direkte elektrische Kopplung

Die Nichtlinearität von H2, so konnten Borst und seine Kollegen nun zeigen, liegt an der elektrischen Verschaltung mit HSE. Dieses spezielle Neuron reagiert auf Bewegungen der Umgebung, die das betreffende Auge wahrnimmt, nämlich nicht mit elektrischen Impulsen, sondern lediglich mit einer Änderung der Spannung über seiner Membran, die es durch elektrische Kopplung an H2 weitergibt. Von dieser Verschiebung im Membranpotenzial aber hängt es ab, wie H2 auf Signale vor dem Auge auf seiner eigenen Seite reagiert – steigt die Spannung, wird das Neuron empfindlicher für Bewegungsreize, sinkt sie, spricht es weniger leicht an. Das nichtlineare Verhalten von H2 kommt also durch eine einzige neuronale Verschaltung zu Stande: die elektrische Kopplung mit HSE.

»Vermutlich nutzt die Fliege drehsensitive Neuronen vor allem im Geradeausflug, um die Richtung einzuhalten und ein Abdriften durch Luftströmungen zu kompensieren«, meint Borst, »die sakkadischen Drehungen selbst sind nicht im Detail visuell rückgekoppelt.«

Die genaue Aufgabe der H2-Zelle bei der Flugsteuerung wird aber schwer zu ermitteln sein. »Natürlich wollen wir den Freiflug der Fliege verstehen. Im Laborexperiment macht man elektrische Ableitungen von einer Zelle und die Versuchung ist groß, das gesamte Verhalten des Insekts daran festzumachen. Das ist natürlich unsinnig. Schließlich hat die Fliege ein paar mehr Neuronen zur Verfügung«, so Borst.

Wie der Forscher schon vor etwa 15 Jahren gezeigt hat, nimmt die Selektivität der Zellen für bestimmte Bewegungen hierarchisch mit den Verschaltungsstufen zu. »Mit unseren jüngsten Experimenten haben wir nun verstanden, wie die Spezifität für Drehreize auf dieser Verschaltungsstufe verstärkt wird«, resümiert Borst das aktuelle Ergebnis.

Katrin Weigmann ist freie Wissenschaftsjournalistin in Göttingen.

MIKROBIOLOGIE

Das kleinste Genom der Welt

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Geiz ist geil: Dieses Motto haben zwei Mikroben auf ihr Erbgut angewandt und ihre genetische Ausstattung auf ein Minimum reduziert. Allerdings drohen sie an ihrer Knauserigkeit zu Grunde zu gehen.

Von Petra Jacoby

Seit vergangenem Oktober liegen im Wettstreit um das kleinste Erbgut zwei Bakterien vorn, die in Zellen von Insekten leben. Für ihre Zukunft prophezeien Wissenschaftler den beiden freilich wenig Gutes. Das eine scheint dem Untergang geweiht, das andere ist auf dem besten Weg, als unselbstständiges Zellorganell zu enden.

Der bisherige Rekordhalter in Sachen minimales Erbgut war ein Exot, der an einem äußerst abgelegenen und unzugänglichen Ort haust: einer heißen Quelle am Grund des Atlantiks. Das *Nanoarchaeum equitans* aus dem urtümlichen Reich der Archaeen vegetiert dort mit seinem Genom aus rund 500 000 »Buchstaben« als winziger Parasit auf einer anderen Mikrobe (Spektrum der Wissenschaft 7/2002, S. 21).

Entthront wurde es nun von einem Organismus, den Nancy Moran und ihre Arbeitsgruppe an der Universität von Arizona in Tucson quasi vor ihrer Haustür fanden: dem Bakterium *Carsonella ruddii*. Es logiert als Endosymbiont in dem nur wenige Millimeter großen Blattfloh *Pachypsylla venusta*, der die Blätter von Zürgelbäumen auf dem Uni-Campus anzapft.

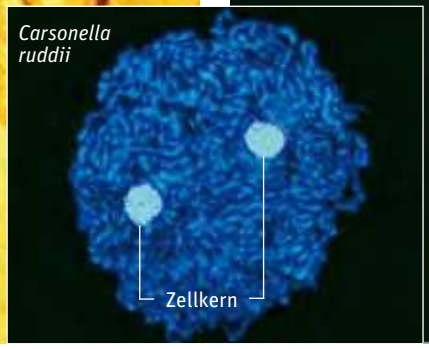
Die Lebensgemeinschaft zwischen den zwei ungleichen Partnern beruht auf Geben und Nehmen. *C. ruddii* bessert die einseitige, zuckerreiche Nahrung des Blattflohs auf, indem es essenzielle Aminosäuren und Vitamine für ihn herstellt. Als Gegenleistung dafür erhält es einen sicheren Wohnraum in so genannten Bakteriozyten – speziellen Zellen des Insekts, die sich in einem gesonderten Organ im Hinterleib befinden. Das Zytoplasma jeder dieser Zellen ist mit Hunderten symbiotischer Mikroben gefüllt, die wie winzige Würmer aussehen.

Meister der Genügsamkeit

Als Nancy Moran und ihre Mitarbeiter zusammen mit Kollegen von der Universität Tokio das Erbgut der unscheinbaren Untermieter sequenzierten, staunten sie nicht schlecht: In einem Ring aus nur knapp 160 000 Paaren von Nukleotiden – den Bausteinen der Erbsubstanz DNA – hat *C. ruddii* sämtliche Informationen gespeichert, die es zum Leben braucht *(Science, Bd. 314, S. 267)*. Einzig Viren kommen mit noch kleineren Genomen aus. Sie zählen jedoch nicht zu den Lebewesen, da sie keinen eigenen Stoffwechsel betreiben und sich nicht selbstständig vermehren können. Zum Vergleich: Das Erbgut des Menschen besteht aus rund drei Milliarden Nukleotidpaaren und selbst das Darmbakterium *Escherichia coli* kommt auf fast fünf Millionen.

In seinem Minigenom beherbergt *C. ruddii* nur 182 Gene – knapp ein Drittel des Bestands von *Nanoarchaeum* und deutlich weniger als das, was Biologen bisher als Mindestausstattung eines Lebewesens ansahen. Damit diese Gene auf den winzig kleinen DNA-Ring passen, sind sie extrem dicht gepackt: Neunzig Prozent von ihnen überlappen sich, und nur drei Prozent aller Nukleotide gehören nicht zur Bauanleitung für ein Protein.

Das spartanische Erbinventar fordert allerdings auch seinen Tribut. Zum Bei-



NANCY A. MORAN, MORAN LABORATORY, UNIVERSITY OF ARIZONA

Der Blattfloh *Pachypsylla venusta* (links) enthält im Bakteriom, einem speziellen Organ im Hinterleib, besondere Zellen, so genannte Bakteriozyten, die das Bakterium *Carsonella ruddii* als Endosymbionten enthalten. Im noch durchsichtigen Körper einer frisch geschlüpften Larve (rechts) ist das Bakteriom als gelbliches »Croissant« zu sehen. Im Fluoreszenzmikroskopbild (Mitte) erscheinen die Bakterien als blaue Würmer, welche die hellen Zellkerne von Bakteriozyten umgeben.

spiel kann das Bakterium viele lebenswichtige Funktionen nicht mehr selbst ausführen und ist dafür auf seinen Blattflohpartner angewiesen. Unter anderem fehlen ihm sämtliche Gene zum Aufbau einer Zellhülle und zur Synthese von Nukleotiden, die es nicht nur für seine Vermehrung, sondern auch zur Herstellung von RNA-Abschriften der Gene für die Eiweißsynthese braucht.

Vom geschätzten Gast zum versklavten Handlanger?

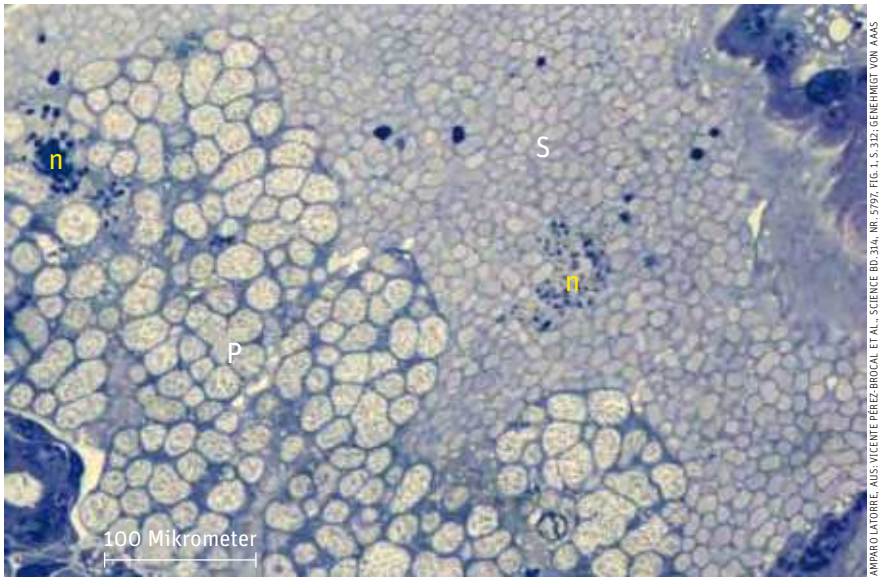
Nancy Moran und ihre Kollegen vermuten, dass die endosymbiotische Mikrobe im Lauf der Evolution Gene an ihren Insektenwirt verloren hat. In diesem Fall wäre *C. ruddii* möglicherweise dabei, sich von einer eigenständigen Art zu einem bloßen Organell in den Bakteriozyten des Blattflohs zu entwickeln.

Das gleiche Schicksal ereilte vor mehr als einer Milliarde Jahren auch den Vorläufer der Mitochondrien – den Kraftwerken von Pilz-, Pflanzen- und Tierzellen. Diese Organellen stammen von ursprünglich frei lebenden Bakterien ab, die von einem Urahn aller kernhaltigen Zellen verschlungen wurden und nach einer Phase als Symbiosepartner schließlich immer mehr verkümmerten. Und auch die Chloroplasten – die Organellen von Pflanzenzellen, in denen die Photosynthese stattfindet – sind Überreste einst eigenständiger Mikroben.

Als Spuren der unabhängigen Vergangenheit besitzen Mitochondrien und Chloroplasten noch ihr eigenes Genom und vermehren sich wie Bakterien durch Zweiteilung. Ihre DNA enthält allerdings nur mehr die Baupläne für einen Bruchteil der Proteine, welche die Organellen für ihre Arbeit benötigen. Die Mehrzahl ihrer Gene wurde nach und nach in den Kern der Wirtszelle ausgelagert. *C. ruddii* mit seinem extremen Schrumpfgenom könnte sich demnach in einem Frühstadium des Übergangs zu einem Organell befinden und so die einmalige Chance bieten, der Evolution bei diesem spannenden Geschehen gewissermaßen über die Schulter zu schauen.

Vom autonomen Organismus zum eingekerkerten Zuarbeiter seiner Wirtszelle degradiert zu werden, ist bereits ein trauriges Schicksal. Die Aussichten für den Eigentümer des derzeit zweitkleinsten Genoms sind indes noch düsterer; denn er scheint gänzlich vom Aussterben bedroht. Ein Forscherteam um Amparo Latorre von der Universität Valencia fand den Silbermedailleninhaber – das Bakterium *Buchnera aphidicola* – gleichfalls in einem Pflanzenparasiten: der Baumlaus *Cinara cedri*, die Zedernnadeln ansticht und deren zuckrige Säfte trinkt *(Science, Bd. 314, S. 312)*. Sein ▷

AMPARO LATORRE, UNIVERSITAT DE VALÈNCIA



AMPARO LATORRE, AUS: VICENTE PÉREZ-BROCAL ET AL., SCIENCE BD. 314, NR. 5797, FIG. 1, S. 312; GENEHMIGT VON AAAS

Die Baumlaus *Cinara cedri* (links) enthält zwei mikrobielle Untermieter, die auf einem angefärbten Dünnschnitt (rechts; n: Zellkern) klar unterscheidbar sind: *Buchnera aphidicola* (P) und *Serratia symbiotica* (S). Der angestammte Endosymbiont *B. aphidicola* hat bereits den größten Teil seines Genoms verloren und wird wohl demnächst völlig von dem Neuankömmling *S. symbiotica* verdrängt.

▷ Genom besteht aus rund 422000 Nukleotidpaaren und umfasst 362 Gene.

Zum Verhängnis wird *B. aphidicola* vermutlich, dass es im Gegensatz zu *C. ruddii* nicht der einzige Untermieter seines Insektenwirts ist. Es teilt sich sein Zuhause mit einem anderen Bakterium namens *Serratia symbiotica*. Die Baumlaus ist deshalb nicht unbedingt auf diesen Symbiosepartner angewiesen. Und so hat die schleichende Gen-Erosion, die das Erbgut von *B. aphidicola* mit der Zeit auszehrte, nicht nur entbehrlichen Ballast beseitigt. Mittlerweile fehlen dem bequem gewordenen Bakterium auch sämtliche Gene zur Herstellung von Vitamin B_2 und der essenziellen Aminosäure Tryptophan – beides Stoffe, die es eigentlich als Pachtzins für das behagliche Quartier an die Baumlaus liefern sollte.

Wie Amparo Latorre und seine Kollegen herausfanden, hat diese Aufgaben inzwischen klammheimlich der Mitbewohner *S. symbiotica* übernommen. Die spanischen Forscher gehen davon aus, dass damit das Schicksal von *B. aphidicola* besiegelt ist: Ohne den evolutionären Druck, für seinen Gastgeber unentbehrlich zu sein, wird es wohl über kurz oder lang aussterben und völlig von *S. symbiotica* ersetzt werden.

Wenn Biologen hartnäckig versuchen, Organismen mit immer kleinerem Genom aufzustöbern, mag zwar auch eine Spur sportlicher Ehrgeiz dahinterstecken. Vor allem aber wollen sie eines herausfinden: Welches ist der Minimalsatz an Genen, mit dem eine Mikrobe gerade noch existieren kann? Wäre die Basisausstattung lebender Zellen bekannt, ließen sich interessante Rückschlüsse darauf ziehen, wie das Leben auf der Erde entstanden ist und wie sich die ersten Organismen entwickelt haben.

Zellen aus der Retorte?

Zudem arbeiten viele Forscher schon seit Jahren daran, künstliche Zellen herzustellen. Der Zweck der geplanten Schöpfungsakte im Reagenzglas liegt darin, kleine Bioreaktoren zu konstruieren, die sich jeweils perfekt auf ihre Aufgabe – etwa die Produktion von Arzneimitteln oder Brennstoffen – zuschneiden ließen.

Mit Plasma gefüllte synthetische Zellhüllen wurden bereits entwickelt. Doch handelt es sich dabei noch nicht um lebendige Organismen. Damit Zellen zum Leben erwachen, brauchen sie ein Genom, in dem ein Enzymapparat verschlüsselt ist, mit dessen Hilfe sie ihren Stoffwechsel steuern und sich eigenständig vermehren können. Die Erkenntnis, dass Zellen wie das endosymbiotische Blattflohbakterium *C. ruddii* fähig sind, mit einem Erbgut aus nur rund 160000 Nukleotidpaaren auszukommen, lässt den Traum von menschengemachten Organismen ein Stück näher rücken; denn in diesem Größenbereich ist es heutzutage sehr wohl möglich, im Labor zusammenhängende DNA-Moleküle herzustellen, die sich als Genome für Designerzellen eignen würden.

Petra Jacoby ist Diplombiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Wittlich.

Der Matheon-Medienpreis 2007

würdigt herausragende journalistische Arbeiten für Printmedien zum Thema Mathematik in technologischen Anwendungen.

Medien preis

Die eingereichten Beiträge sollen in verständlicher Form für eine breite Öffentlichkeit geschrieben sein. Arbeiten, die fachübergreifende Aspekte hervorheben, werden bevorzugt. Prämiert werden drei Beiträge.

Der erste Preis ist mit 1500 € dotiert, der zweite Preis mit 1000 € und der dritte mit 500 €. Vorbehaltlich der Zustimmung der Redaktion besteht die Möglichkeit, prämierte Arbeiten in der Zeitschrift Spektrum der Wissenschaft zu veröffentlichen.

Einsendeschluss ist der 30.7.2007
(Poststempel oder E-Mail)

Weitere Informationen
DFG-Forschungszentrum Matheon
Rudolf Kellermann
Tel. +49 (0)30 314 292 74
Email kellermann@matheon.de
www.matheon-medienpreis.de

METEOROLOGIE

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Klima-Fernwirkung von Luftverschmutzungen

Jüngste Untersuchungen ergaben: Sahara-Staubkörnchen sowie Smogpartikel aus Süd- und Ostasien ändern über atmosphärische Kopplungen auch in Europa und Sibirien das Klima.

Von Sven Titz

Schon lange ist bekannt, dass Staubpartikel Wetter und Klima beeinflussen können. Winzige Schwebeteilchen in der Luft reflektieren und absorbieren nicht nur Sonnenlicht, sondern fördern als Kondensationskeime auch die Wolkenbildung, was sich auf den Niederschlag auswirkt. So haben William Lau vom Goddard-Raumfahrtforschungszentrum der Nasa in Greenbelt (Maryland) und Kyu-Myong Kim von der Universität von Maryland in Baltimore kürzlich herausgefunden, dass der zunehmende Smog über Indien den Monsunregen im Frühsommer verstärkt.

Doch machen sich Aerosole – wie die festen oder flüssigen Schwebeteilchen in der Luft fachsprachlich heißen – nicht nur lokal bemerkbar. Nach den Ergebnissen neuerer Untersuchungen beeinflussen sie die Atmosphäre auch über große Distanzen. Zum Beispiel hat ein Team um Lau jetzt nachgewiesen, dass sich die Staubstürme der Sahara und die Smogpartikel Ost- und Südasiens auf das Wetter und Klima in ganz Eurasien auswirken – und zwar sogar dort, wo die Atmosphäre relativ frei von Staubteilchen ist *(Journal of Climate 9/2006, S. 4799)*. »Selbst in weit entfernten Regionen, in denen die Luft kristallklar ist, können Aerosole einen Effekt ausüben«, sagt Lau.

Zur Untersuchung dieser Fernwirkungen führte sein Team Computersimulationen durch. Dabei verwendete es ein institutseigenes globales Zirkulationsmodell der Atmosphäre, das auch die Mikrophysik von Wolken gut simulieren kann. Zudem speisten die Forscher Daten über realistische Aerosolquellen ein, die aus direkten Messungen sowie einem anderen Computerprogramm stammten: dem Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport Model, das den Transport, die Strahlungseigenschaften und die Chemie verschiedener Luftschwebeteilchen beschreibt. Dabei werden fünf Aerosoltypen unterschieden: schwarzer Kohlenstoff (Ruß), organischer Kohlenstoff (zum Beispiel Pollen), Staub (mineralisch), Sulfataerosole (entstanden aus Schwefeldioxid) und Meersalz.

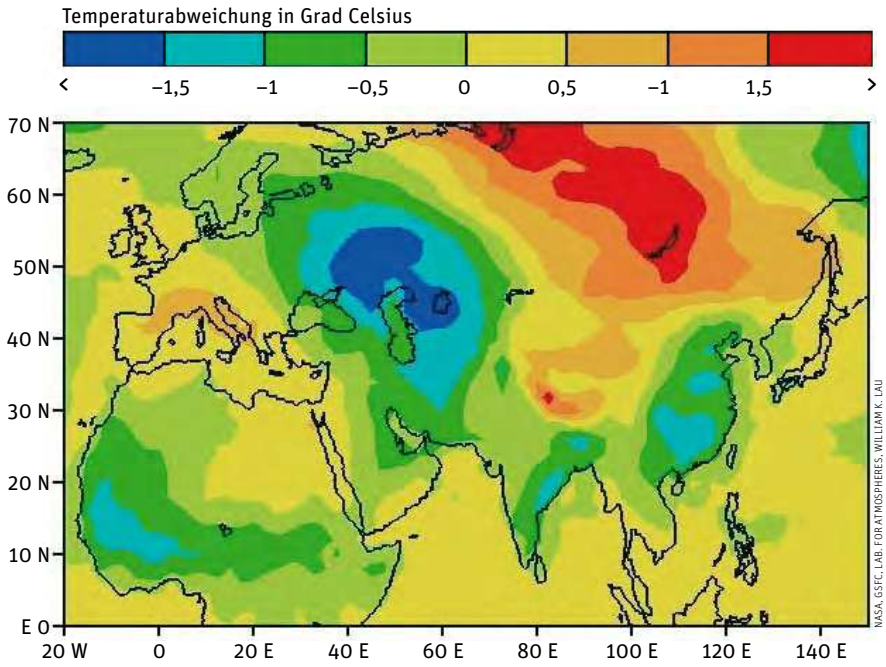
Die wichtigste natürliche Staubquelle der Erde ist die Sahara. Stürme wirbeln dort feine Sandpartikel mehrere Kilometer in die Höhe. Weht der Wind die Teilchen bis über die Alpen, färben sich sogar in Süddeutschland die Wolken gelborange.

Auch der Mensch erzeugt in großen Mengen Aerosole – hauptsächlich bei Verbrennungsvorgängen in Verkehr, Kraftwerken und Industrie sowie bei Brandrodungen. China ist der unangefochtene weltweite Spitzenreiter in Sachen anthropogener Aerosole, doch auch über Indien und Indonesien wabert zeitweilig eine braune Smogglocke, die Europäer so noch nie gesehen haben.

Saharastaub und Smog über China erwärmen Sibirien

Lau und seine Kollegen simulierten die Fernwirkung von Luftschwebstoffen aus der Sahara und Süd- sowie Ostasien speziell im Frühling. Zwischen März und Mai schweben nämlich besonders viele Staubpartikel in der Luft über Eurasien, weil die sommerlichen Monsunregen sie noch nicht auswaschen konnten.

Zunächst einmal fand das Team die schon länger bekannten lokalen Wirkungen bestätigt: Sowohl in der Sahara als auch in Ostasien kühlen die Aerosole die bodennahe Luftschicht, weil sie die Sonnenstrahlung abschirmen. In größeren Höhen, wo sich die Schwebeteilchen konzentrieren, erwärmt sich hingegen die Atmosphäre. Dies liegt an den beiden speziellen Aerosoltypen, die hier im Spiel sind: Mineralischer Staub aus der



Wie Saharastaub und Smog über Ostasien die Mitteltemperaturen auf dem gesamten eurasischen Kontinent verändern, hat ein Team um William Lau vom Goddard-Raumfahrtforschungszentrum der Nasa in Greenbelt (Maryland) im Computer simuliert. Die größten Effekte treten demnach in Regionen mit relativ klarer Luft auf: in Sibirien und nördlich des Kaspischen Meers.

Sahara und Ruß aus Ostasien absorbieren die Sonnenstrahlung jeweils stark und heizen sich dabei auf.

Diese örtlichen Temperaturänderungen haben allerdings Folgen, die weit über das lokale Umfeld hinausreichen. Wie man schon länger weiß, löst eine durch Strahlungsabsorption erwärmte Luftschicht, die hunderte bis tausende Kilometer lang und breit ist, in der Atmosphäre so genannte barotrope Rossbywellen aus. Diese periodischen Schwankungen im atmosphärischen Druck- und Temperaturfeld führen über Kontinente hinweg auch zu einer Umverteilung der Hoch- und Tiefdruckgebiete.

Dadurch bleibt der klimatische Einfluss des Saharastaubs nicht auf Nordafrika und Ostasien beschränkt. Die Computersimulationen lieferten vielmehr einen Wellenzug, der sich von der Sahara in nordöstlicher Richtung bis nach Sibirien fortpflanzt. Als Folge davon steigt der Luftdruck über Mittel- und Osteuropa sowie über Ostasien, während er über dem äußersten Norden Eurasiens und über dem Tibet-Plateau fällt.

Auch die Temperaturen an der Oberfläche ändern sich weiträumig: Nördlich des Kaspischen Meers verursacht das Luftdruckmuster eine Abkühlung und in Sibirien eine Erwärmung um jeweils mehr als ein Grad Celsius. Im nörd- ▷

Mehrmals im Jahr weht Saharastaub übers Mittelmeer bis weit nach Europa hinein. Dadurch beeinflusst er auch das hiesige Klima.

NASA, MODIS, JACQUES DESCLOITRES

Wie Staub das lokale Klima beeinflusst

Aerosole wirken durch ein ganzes Bündel von Effekten auf das Klima ein. Zunächst einmal kühlen sie die bodennahe Luft, weil sie Sonnenstrahlung teils ins All reflektieren, teils absorbieren. Die Luftschicht, in der sich die Partikel befinden, erwärmt sich dagegen.

Dieser direkte Effekt verändert zum Beispiel das Klima im tropischen Westafrika und im Kongobecken. Vor allem im Herbst und Winter verringern Partikel aus der Biomasse-Verbrennung die Sonneneinstrahlung am Boden. Die resultierende Abkühlung ist so groß, dass sie die Erwärmung durch Treibhausgase kompensieren kann. Das stellten Heiko Paeth von der Universität Würzburg und Johann Feichter vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg kürzlich anhand von Klimasimulationen fest.

Über den direkten Effekt hinaus beeinflussen Aerosole aber auch das Klima, weil sie als Kondensationskeime wirken. In ihrer Gegenwart bilden sich dadurch mehr Wolkentropfen, die bei gleicher Wassermenge dafür kleiner werden. Dieser indirekte Effekt verändert nicht nur den Lebenszyklus der Wolken und den Niederschlag, sondern mittelbar auch wieder den Strahlungshaushalt.

Im Amazonasgebiet zum Beispiel sorgen die Ascheteilchen, die bei Rodungsbränden im Regenwald entstehen, für mehr Niederschlag. Das haben Klimaforscher um Roger A. Pielke sen. von der Universität von Colorado in Boulder anhand von Messungen aus den Jahren 2000 und 2003 herausgefunden. Demnach bewirkt der Ruß, dass Gewitterwolken länger bestehen bleiben und ihre Oberseite kälter ist als sonst.

Über dem Pazifik macht sich der indirekte Effekt ganz ähnlich bemerkbar: Eine Forschergruppe um den Chemie-Nobelpreisträger Mario Molina von der Universität von Kalifornien in San Diego stellte vor Kurzem fest, dass der Smog aus Asien über dem Nordpazifik die Schauerbewölkung um 20 bis 50 Prozent verstärkt hat.

Selbst in der Arktis ist der Einfluss anthropogener Schwebeteilchen zu spüren. Dort konstatierten Dan Lubin von der Scripps Institution of Oceanography in La Jolla (Kalifornien) und Andrew Vogelmann von der Universität von Kalifornien in San Diego einen Erwärmungstrend, der ebenfalls auf dem indirekten Aerosoleffekt beruht. Winzige Schmutzpartikel, die aus Industriegebieten in Europa und Asien stammen, modifizieren die mikrophysikalischen Eigenschaften arktischer Wolken. Dadurch ist es in der Nordpolarregion stärker bewölkt, weshalb die Infrarot-Rückstrahlung von der Wolkendecke zum Boden um 3,4 Watt pro Quadratmeter zugenommen hat. Dieser Betrag sei, schreibt das Duo, mit der Wirkung der Treibhausgase vergleichbar.

▷ lichen Mittelmeerraum steigt die Temperatur ebenfalls um einige Zehntelgrad.

Interessanterweise ähnele dieses Muster dem Temperaturtrend in Eurasien zwischen 1970 und 1990, berichten die Forscher. Es könne also gut sein, dass die wachsende Umweltverschmutzung diesen Trend verursacht hat. »Die Fernwirkungen, die wir gefunden haben, scheinen zwar hauptsächlich vom Saharastaub auszugehen«, erläutert Lau, »aber die anthropogenen Aerosole – zum Beispiel aus China – verstärken diese Luftdruckmuster noch.«

Aerosole und Atmosphärenzirkulation hängen zusammen

Der Wissenschaftler betrachtet seine Untersuchung als neuen Ansatz, der zwei bislang getrennte Teilgebiete der Meteorologie zusammenführt, und möchte deren jeweilige Vertreter zu einer engeren Zusammenarbeit ermuntern. »Die Aerosolexperten betrachten meist die Wirkung der Schwebteilchen in der unmittelbaren Umgebung von Städten oder anderen Quellregionen oder sie untersuchen die Transporteigenschaften der Partikel. Die Experten für Atmosphärenzirkulation sind hingegen eher an den großräumigen Temperatur-, Druck- und Windmustern des Wetters interessiert«, erklärt er. Dadurch würden die Fernwirkungen der Aerosole und der Einfluss des Staubs auf den Wasserkreislauf weit gehend übersehen.

In dieser Hinsicht sind auch die Szenarien im Klimabericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) für die Vereinten Nationen ergänzungsbedürftig. Die verwendeten Computermodelle enthalten nach Aussage von Lau keine realistischen raumzeitlichen Verteilungen von Staub. Diesem Aspekt werde bei aktuellen Klimasimulationen einfach keine große Aufmerksamkeit geschenkt. Das ist umso erstaunlicher, als niemand bezweifelt, dass Aerosole eine wichtige Komponente des Klimasystems sind.

In der Forschung spielen die Schwebstoffe denn auch eine sehr große Rolle. Das zeigte sich zuletzt bei der Herbsttagung der American Geophysical Union in San Francisco, einer der wichtigsten Konferenzen weltweit für Geowissenschaftler. Dort gab es mehr als 300 Beiträge zum Thema Aerosole.

Sven Titz ist promovierter Meteorologe und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Springers Einwürfe

So freudig das Erinnern, so gnädig das Vergessen

Besser, die Suche nach der verlorenen Zeit ist nicht allzu erfolgreich

»Lange Zeit bin ich früh schlafen gegangen.« Mit diesem unscheinbaren und doch programmatischen Satz beginnt Marcel Proust (1871–1922) seinen Roman »Auf der Suche nach der verlorenen Zeit«. Das siebenbändige Werk, ein Basistext der modernen Literatur, ist ein Fest der Erinnerung. Minutiös zeichnet die Hauptfigur ihre Erlebnisse im Pariser Fin de Siècle auf – und darin spielen Schlaf, Traum und das beglückende Auftauchen vergangener Ereignisse eine zentrale Rolle.

Berühmt auch unter den vielen, die Prousts Magnum Opus nie ganz gelesen haben, ist das ziemlich zu Beginn geschilderte »Madeleine-Erlebnis«: Das Aroma eines in Lindenblütentee getauchten Sandgebäcks ruft im überraschten Erzähler ungeheuer plastisch Combray, den Ort seiner Kindheit, wach – »alles deutlich und greifbar«.

In einem seltenen Fall von Anregung einer Forschungsidee durch schöngeistige Literatur hat jüngst ein Team um den Neurowissenschaftler Jan Born von der Universität Lübeck aus der Madeleine-Episode eine Serie von Experimenten zu Schlaf und Traum, Geruch und Erinnerung entwickelt. Demnach können Düfte nicht nur unser Gedächtnis unterstützen, indem sie mit Erlebnissen assoziiert werden, sondern auch über Nacht Erinnerungen konsolidieren helfen (siehe Meldung auf S. 12).

Wenn schon gelegentliches Erinnern so glücklich macht wie bei Proust geschildert, wie schön müsste dann erst die »totale Erinnerung« sein? Käme es nicht einem unaufhörlich verdoppelten Sinnenrausch gleich, die Gegenwart zu erleben und zusätzlich die komplette Vergangenheit präsent zu haben? Gedacht, getan: Auf S. 84 in diesem Heft wird der Versuch geschildert, mit allen elektronischen Mitteln das digitale Archiv eines Menschenlebens anzulegen. Das hätte, wie im Artikel ausgeführt, nicht nur viele praktische Vorteile, sondern würde, konsequent zu Ende gedacht, jedem endlich per Mausklick seine komplette Autobiografie zugänglich machen.

Ich muss gestehen, dass mich bei dieser Vorstellung Atemnot befällt, als sollte ich eine von Tag zu Tag ins Unermessliche anschwellende Last hinter mir herschleppen. Der argentinische Schriftsteller Jorge Luis Borges hat in seiner Kurzgeschichte »Das unerbittliche Gedächtnis« die Qual eines Menschen ausgemalt, der nicht vergessen kann: »Schlafen fiel ihm sehr schwer. Schlafen heißt, sich von der Welt erholen ... die unbedeutendste seiner Erinnerungen (war) genauer und lebendiger als für uns die Wahrnehmung eines physischen Lustgefühls oder einer physischen Qual.« Nicht viel angenehmer käme mir ein digitales Totalarchiv meines Lebens vor. Das gäbe eine unterschiedslos flache Datenwüste, in der alles verzeichnet wäre, alles gleich wichtig – und das heißt gleich unwichtig.

Da lobe ich mir den Schlaf. Er verfestigt offenbar die eine oder andere Erinnerung – aber beileibe nicht alles! Manche Schlafforscher, so Giulio Tononi von der Universität von Wisconsin in Madison, betonen die umgekehrte Rolle des allnächtlichen Bewusstseinsverlusts: Hier und da mag das weiter tätige Gehirn, indem es die im Wachen aufgenommenen Informationen rekapituliert und reorganisiert, Synapsen stärken, welche bedeutsame Erinnerungen konservieren, aber generell werden die neuronalen Verbindungen geschwächt. Der Schlaf löscht quasi den kurzfristigen Informationsspeicher, entrümpelt das Gedächtnis und macht den Kopf frei für die neuen Erlebnisse des kommenden Tages.

Michael Springer

Nur darum kann das plötzliche Auftauchen einer Erinnerung so sehr überraschen und so sehr freuen, wie es bei Proust unvergesslich beschrieben steht.

Die Pein der Verlegenheit

Verlegen sein dient unseren Sozialkontakten. Doch häufig verführt uns die Angst vor Peinlichkeit zu einem Verhalten, mit dem wir uns selbst schaden.

Von Christine R. Harris

Als sie das Café betritt, stolpert die Dame. Sie errötet spontan, unwillkürlich grinst sie auch. Ein paar endlose Augenblicke ist ihr äußerst unbehaglich zu Mute. Endlich hat sie einen Platz gefunden. Sie setzt sich – und schnell ist alles wieder im Lot.

An sich belanglose Vorfälle, die wir als peinlich empfinden, begegnen uns im sozialen Alltag allenthalben. Merkwürdigerweise erleben Betroffene solche Situationen oft keineswegs als trivial. Das eigenartige Gefühl der Verlegenheit – nicht zu verwechseln mit Scham – kann unser Verhalten erstaunlich stark beeinflussen. Um diese Emotion zu vermeiden, verhalten sich viele Menschen sogar unklug, bis hin zur Gesundheitsgefährdung.

Wann reagiert man betreten? Zunächst: Die Situationen, in denen Menschen verlegen werden, lassen sich objektiv nicht völlig erfassen. Ein subjektiver Faktor kommt hinzu, was übrigens für alle Gefühle gilt. Emotionspsychologen sprechen von kognitiver Bewertung. Sie meinen damit, dass wir glauben, uns im Leben an bestimmte vorgegebene Regeln halten zu müssen. Die These: Welche Emotionen ein Ereignis auslöst, hängt davon ab, welche Bedeutung wir ihm beimessen.

Plötzlich im Mittelpunkt

Nehmen wir ein leichter begreifliches Gefühl: Angst. Ein Dompteur, der gerade mit einem Löwen trainiert, hört einen Besucher zufällig sagen, er habe gelesen, der Zirkus sei pleite. Der Dompteur könnte nun Angst in sich aufsteigen fühlen – aber nicht vor der Raubkatze. Angst hat man, weil man sich bedroht fühlt, weil man das eigene Wohlergehen in Gefahr glaubt. Unzählige soziale und andere Bedingungen können diese Emotion auslösen. Es kommt darauf an, was jemand als unangenehm oder unheilvoll einstuft.

Zur Verlegenheit existieren mehrere wissenschaftliche Ansätze. Nach Auffassung unter anderem von Rowland S. Miller von der Sam-Houston-Staatsuniversität in Huntsville (Texas) liegt dem Gefühl zu Grunde, dass jemand vorhersieht, andere würden ihn ungünstig einschätzen. Wir glauben, das Bild, das andere von uns haben sollen, könnte in Gefahr geraten. Unserem Alltagsverständnis dürfte diese Deutung der Emotion am nächsten kommen.

Vielfach mag diese Erklärung tatsächlich passen. Aber warum bringt die meisten von uns ein Geburtstagsständchen der Freunde im Restaurant in Verlegenheit? In diesem Zusammenhang denkt ja keiner schlecht von einem. Nach Ansicht von John Sabini von der Universität von Pennsylvania und seinen Kollegen wird jemand verlegen, weil er glaubt, dass eine angenehme soziale Situation gleich unterbrochen wird, er aber nicht so recht weiß, was die anderen nun von ihm erwarten. Derjenige hat eigentlich keine Angst, sich zu blamieren, doch er weiß nicht recht, was er gleich tun soll.

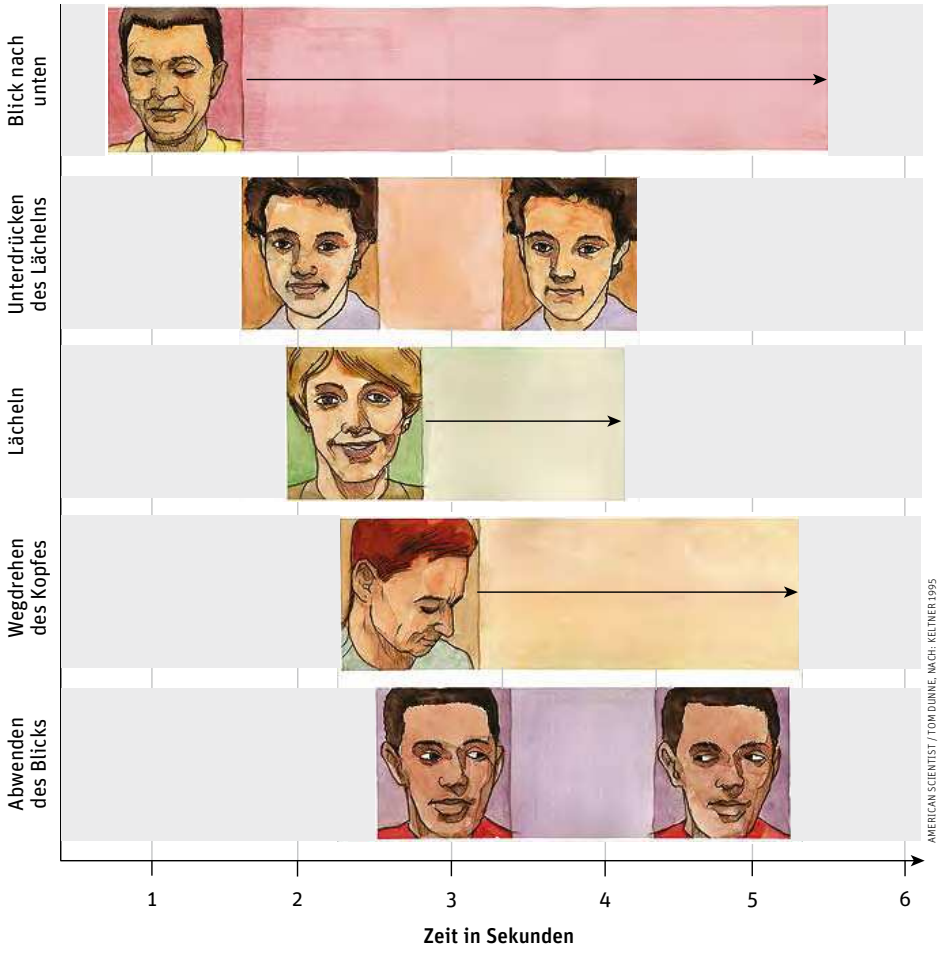
Hierzu brachte Sabini etliche Beispiele. So ist es vielen Leuten unange- ▷

In Kürze

- **Verlegenheit** dürfte eine **weltweit bei Menschen auftretende Emotion** sein, deren evolutionäre Wurzeln die Wissenschaftler nicht kennen. Sie vermuten, dass die Gemütsbewegung im Ursprung dem Gruppenzusammenhalt diente.
- Um das unangenehme Gefühl zu vermeiden, begehen Menschen allerdings auch dumme **Fehler** und riskieren unnötige **Gefahren**.
- Die **Grenzen zur Scham** sind nicht völlig scharf, doch es gibt zwischen beiden Emotionen, ihrem Kontext und ihrem Ausdruck, klare Unterschiede.

Typische Äußerungen bei starker Verlegenheit: lächeln, wegschauen, das Gesicht verstecken.

LORENZFOTO / FOTOLIA.DE



Bei Verlegenheit arbeitet die Mimik in einer typischen zeitlichen Folge – auch dann, wenn einige Elemente fehlen. Zuerst senkt sich der Blick. Dann muss die Person lächeln, versucht das aber zu unterdrücken, oft erfolglos. Etwas später wendet man Kopf und Blick ab (verändert nach D. Keltner 1995).

nehm, einen Freund an eine Geldschuld zu erinnern – obwohl das eher dem Freund peinlich sein müsste. Oder wie soll man auf Komplimente über gutes Aussehen reagieren? Soll man sie erwidern? Oder sagen, man wisse bereits, wie attraktiv man sei?

Nach neueren Forschungen beschreibt keine Theorie alle Versionen von Verlegenheit. Zumindest scheint es zwei, vielleicht drei größere Unterformen der Emotion zu geben. Drei grobe Typen postulierten Sabini und Mitarbeiter, als sie auswerteten, wie peinlich Testpersonen bestimmte vorgestellte Situationen empfinden würden. Sie nannten die drei Typen: »Benimm-Ausrutscher«, »plötzlich im Mittelpunkt stehen« und »heikle Situation«.

Ein typisches Szenario eines Benimm-Ausrutschers: Im Museum hatten Sie die Toilette aufgesucht, stehen nachher mit fremden Leuten zusammen, und die Aufsicht ruft Ihnen zu, der Rock sei hinten eingeklemmt. Unerwartet im Mittelpunkt findet man sich zum Beispiel als Ehrengast einer Überraschungspartie. Eine heikle Situation wäre der oben erwähnte Fall, einen Freund dringend um die Rückgabe von Geld bitten zu müssen.

Interessanterweise fanden viele Versuchspersonen die drei Arten von Peinlichkeit verschieden schlimm, aber sie bewerteten das durchaus nicht einheitlich. Wer etwa Benimmfehler als sehr unangenehm einstufte, hielt vielleicht die anderen Beispiele nicht unbedingt für besonders peinlich. Wem mulmig wurde, an die Mittelpunktszene nur zu denken, glaubte vielleicht, mit den anderen Fällen leicht fertig zu werden und so weiter. Persönlichkeitsmerkmale schienen dabei einigen Einfluss zu haben. Einen Ausrutscher beispielsweise fürchteten Personen mit geringem Selbstwertgefühl am meisten. Extrovertierte Menschen schreckte eine heikle Begebenheit weniger als andere.

Betretenheit hängt offenbar mit Selbstbewusstsein zusammen – sich klar seiner selbst bewusst sein. Kindern scheint dieses Gefühl erst möglich zu werden, wenn sie sich – mit 15 bis 24 Monaten – selbst im Spiegel erkennen. Die Emotion taucht somit wesentlich später auf als Zorn, Angst und sogar als Eifersucht. Wie es aussieht, zeigen sich Kleinkinder zuerst verlegen, wenn sie plötzlich nicht wissen, wie sie einer Situation begegnen könnten. Viele reagieren so, wenn man sie eifrig bewundert. Mit etwa drei Jahren dann kann ein Kind verlegen wirken, wenn es bestimmten Erwartungen nicht genügt.

Die meisten von uns wollen nicht unangenehm auffallen, weder dem Chef noch Freunden, und schon gar nicht einem potenziellen Partner. Das betrifft den sozialen Umgang wie die Körperfunktionen. Vielleicht war die Akzeptanz durch andere für die Menschen der Frühzeit sogar noch dringlicher als für uns heute. Das Leben in der Gruppe bot mehr Sicherheit, forderte aber auch auf vielen Ebenen Harmonie im Sozialverband. Nach Ansicht zahlreicher Forscher entwickelte sich das Gefühl Verlegenheit als eine Hilfe bei unabsichtlichen Verstößen gegen die soziale Norm – wenn es wichtig war, die Sache schnell wieder zu richten. Wer Zerknirschung zu äußern vermochte, konnte nur gewinnen, auch bei der Fortpflanzung. Soziale Ächtung bedeutete dagegen Mangel und Gefahr, unter Umständen den Tod.

Drei Hauptfunktionen dürfte Verlegenheit bedienen.

- Erstens funktioniert ihr Ausdruck als Besänftigungsgeste – als Signal, dass der Verstoß nicht absichtlich geschah und auch nicht wieder erfolgen soll.
- Zweitens ist zu erwarten, dass wir so ein ekliges Gefühl nicht noch einmal er-

Die Gesichtsausdrücke zwischen amüsiert sein (ganz links) und höchst verlegen sein (ganz rechts) wissen Betrachter meist leicht zuzuordnen. Sie verstehen auch andere Verlegenheitszeichen, etwa das Erröten – das der Betrachter eher wahrnimmt als der Betroffene (verändert nach D. Keltner 1995).

leben möchten und aus dieser Angst heraus alles daransetzen, das dafür verantwortliche Verhalten zu umgehen. Demnach wäre Verlegenheit ein soziales Gegenstück zu körperlichem Schmerz. Die empfundene Pein zeigt an, dass unser soziales Wohlbefinden in Gefahr ist.

▶ Drittens motiviert Verlegenheit zur Schadensbehebung. Ein Betroffener bemüht sich, vor den anderen wieder besser dazustehen.

Ob Verlegensein andere wirklich besänftigt, haben Forscher verschiedentlich untersucht. In einer der Studien sahen die Teilnehmer eine von vier Versionen eines Films, in dem ein Mann in einem Supermarkt versehentlich eineinhalb Meter hoch aufgetürmte Toilettenpapierrollen umstieß. Mal zeigte der Mann sich peinlich berührt, mal nicht; mal schichtete er die Rollen wieder auf, mal nicht. Die höchsten Noten für »Reife« erhielt er, wenn er den Schlamassel in aller Ruhe wieder behob. Die höchsten Sympathiewerte bekam er dagegen, wenn man ihm anmerkte, wie peinlich ihm das Ganze war – egal, ob er wieder für Ordnung sorgte oder nicht. Im Übrigen strafen Mütter ein Kind weniger, das nach einem Missgeschick verlegen wirkt. Auch gelten Menschen, die bei einem Benimm-Ausrutscher rot werden, für vertrauenswürdiger als andere.

Das Erröten des Verräters

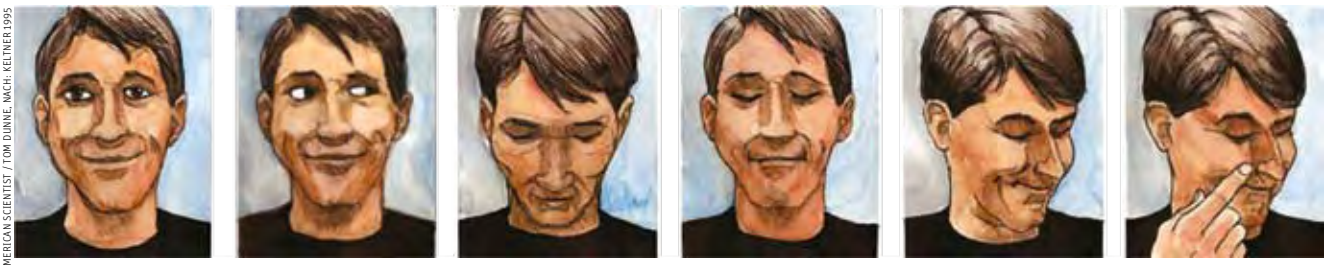
Damit Erröten besänftigt, müssen die anderen aber zugleich glauben, dass derjenige den Vorfall nicht beabsichtigte oder dass ihm die Sache wirklich leidtut. An der Universität Maastricht spielten Studentinnen in wiederholten Runden das so genannte Gefangenendilemma. Bei diesem Gewinnspiel mit zwei Teilnehmern geht es um kleine Geldmengen (stellvertretend für Gefängnisjahre im theoretischen Modell der Spieltheorie). Bei jedem Zug muss man sich für Kooperation oder Verrat entscheiden, ohne die Entscheidung des anderen zu kennen. Der höchste Gewinn winkt einem Verräter, wenn der Partner im selben Zug kooperiert – Letzterer geht dann leer aus. Kooperieren beide, erzielen sie immerhin eine höhere Auszahlung, als wenn beide Verrat üben.

Ausgewählt wurden nun besonders sozial eingestellte junge Frauen, die gern kooperierten. Sie erfuhren, es würde moralisches Verhalten gemessen. Eine der beiden erhielt die Anweisung, sich bei einem bestimmten Zug für Verrat zu entscheiden. Wenn Teilnehmerinnen das befolgten, erröteten sie oft. Interessanterweise hielten die Gegnerinnen eine Verräterin für umso weniger vertrauenswürdig, je stärker diese errötete – vermutlich, weil sie das als Signal eines willkürlichen, absichtlichen moralischen Verstoßes einstuften.

Wie Verlegenheitsäußerungen auf andere wirken, scheint unter anderem davon abzuhängen, wie schwer der Verstoß war, ob der Beobachter oder jemand anders Schaden erlitt, und auch, ob es sich um einen einmaligen Vorfall handelte oder die Sache von einem Charakterfehler oder irgendeiner persönlichen Schwäche zeugte. Zum letztgenannten Punkt liegt eine aufschlussreiche Studie vor. Eine Frau suchte College-Kurse auf, angeblich um Teilnehmer für ein Forschungsprojekt zu gewinnen. Manchmal kam sie völlig ruhig in den Raum, brachte ihr Anliegen ohne Zwischenfall vor und verteilte die Unterlagen. In anderen Fällen ließ sie Papiere fallen, wurde ein wenig verlegen, fing sich aber wieder. Bei einer dritten Version verlor sie nicht nur die Unterlagen, sondern auch die Nerven und rannte einfach aus dem Raum, sodass der Kursleiter die Papiere verteilen musste.

Am meisten Teilnehmer meldeten sich bei der zweiten Szenerie. Es könnte sein, dass die Studenten die Frau in der dritten Version schlicht für unfähig hielten. Freundliche Emotionen löst beobachtete Verlegenheit offenbar eher aus, wenn sie nicht als Zeichen eines Makels wahrgenommen wird, sondern als vorübergehender Zustand. Ob das wirklich zutrifft, müssen genauere Untersuchungen zeigen.

Dass eigene Verlegenheit zu sozialem Verhalten motiviert, erwies ein Versuch, bei dem Teilnehmer sich unmöglich be- ▷



AMERICAN SCIENTIST / TOM DUNNE, NACH: KELTNER 1995

Lächeln
Blick geradeaus

Lächeln
zur Seite blicken
andere Aktivität

nach unten blicken
Kopf senken

nach unten blicken
Lächeln unterdrücken

Lächeln unterdrücken
Kopf abwenden
nach unten blicken

Lächeln unterdrücken
Kopf abwenden
Gesicht berühren

▷ nehmen, zum Beispiel den Wutanfall eines fünfjähriges Kindes vorspielen sollten. Ein fingierter Mitwirkender, der durch ein Fenster zugesehen hatte, bat den Probanden anschließend um Mitarbeit bei einem anderen Projekt, bei dem man jeden Tag eine halbe Stunde lang Fragebögen ausfüllen müsse. Wer vorher verlegen gewesen war, bot durchschnittlich 15 Tage Hilfe an, andere Mitwirkende neun Tage – und das, obwohl die Probanden sich für die peinliche Situation gewiss nicht wirklich verantwortlich fühlten.

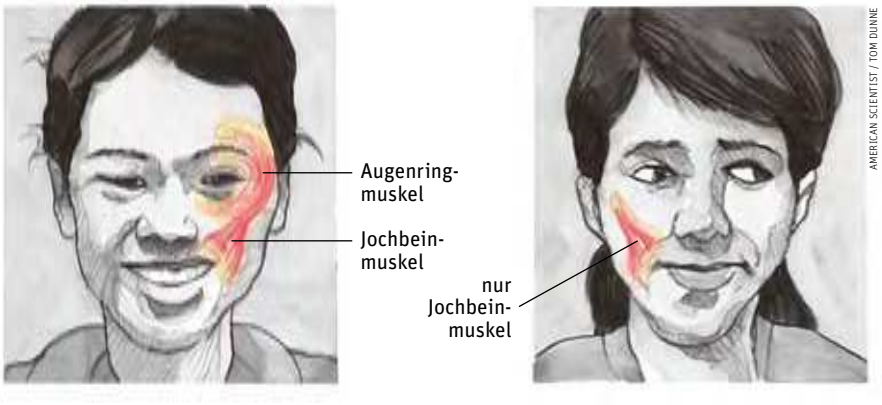
Verlegenheit auszudrücken wirkt hingegen befreiend. In einem Experiment sollten Studenten eine Liebesschnulze vorsingen, die lange ein Hit gewesen war. Anschließend kreuzten zwei Drittel der Leute an, ob und wie peinlich ihnen ihr Gesinge war. Die Hälfte von ihnen gab den Zettel gleich dem Versuchsleiter – der ihn ansah –, die andere Hälfte warf ihn in einen Kasten. Ein Drittel der Teilnehmer wurde nicht befragt. Etwas später sollten alle Mitwirkenden sagen, ob sie sich noch unwohl fühlten. Am meisten litten jetzt noch jene Studenten, die sich vorher überhaupt nicht hatten äußern können. Am besten ging es den Studenten, die ihren Zettel dem Versuchsleiter direkt gegeben hatten (siehe Bild rechts). Vermutlich verfliegt das Unbehagen durch eine peinliche Situation am schnellsten, nachdem man es eingestanden oder seine Verärgerung geäußert hat. Wer etwas Peinliches getan hat, neigt anderen Studien zufolge ohnehin dazu, sich zu entschuldigen, oder versucht, es wiedergutzumachen, besonders dann, wenn man jemandem Unannehmlichkeiten bereitet hat.

Verhält jemand sich taktlos oder verstößt gegen eine Norm, sagt er zum Beispiel etwas Grobes oder Verletzendes, zeigt normalerweise sein Benehmen gleich danach, ob das Absicht war oder ein Versehen. Gibt er sich verlegen, schließen andere eher auf einen Ausrutscher, den sie nicht so übel nehmen wie eine gezielte Beleidigung. Denn sonst würde der Betreffende signalisieren, dass er die sozialen Normen nicht teilt.

Viele nonverbale Signale helfen, beides zu unterscheiden. Verlegenheit stellt sich in einem bestimmten zeitlichen Verlauf von Gestik und Mimik dar, der binnen fünf Sekunden abläuft. So fassen sich die Leute oft ins Gesicht. Was mit dem Gesichtsausdruck typischerweise passiert, hat Dacher Keltner von der Universität von Kalifornien in Berkeley eingehend untersucht. Charakteristisch sind der Blick nach unten, das Lächeln und Anstrengungen, es zu unterdrücken oder wenigstens zu mildern – beispielsweise durch Zusammenpressen der Lippen. Auch wendet sich der Blick oft zur Seite, häufig nach links. Wir wissen nicht, warum er gerade zu dieser Seite geht. Es könnte daran liegen, dass die rechte Großhirnhemisphäre aktiviert wird. Anderen Quellen zufolge könnte diese Hirnseite bei negativen Gefühlen, die mit dem Wunsch zu Entfliehen einhergehen, stärker arbeiten als die linke.

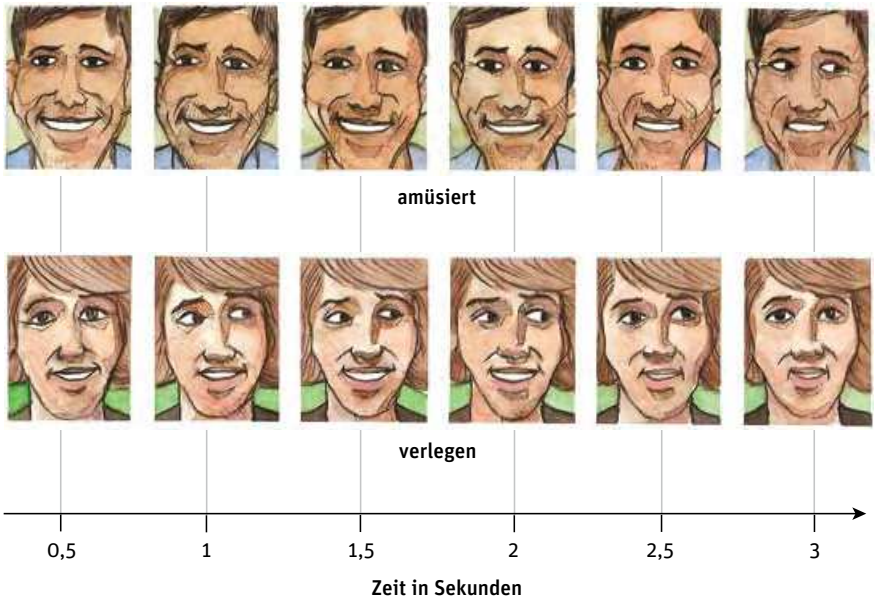
Verlegenes Grinsen sieht anders aus als amüsiertes. Bei Heiterkeit kontrahiert sich außer dem so genannten Großen Jochbeinmuskel – der vom Mundwinkel zum Jochbein zieht – auch der Augenringmuskel, bei verlegenem Lächeln nicht (siehe Bild links). Wie Jens Asendorpf von der Humboldt-Universität Berlin aufzeigte, wenden peinlich Betroffene den Blick etwa eineinhalb Sekunden vor dem stärksten Grinsen ab. Wenn einen etwas belustigt, schaut man erst eine halbe Sekunde nach dem breitesten Lächeln weg. Dass Menschen diese feinen Unterschiede tatsächlich erfassen, konnten Keltner und Kollegen mit Videofilmen nachweisen. Wir sehen es meist ohne Weiteres, ob jemand verlegen ist, ob er sich amüsiert oder ob er sich schämt.

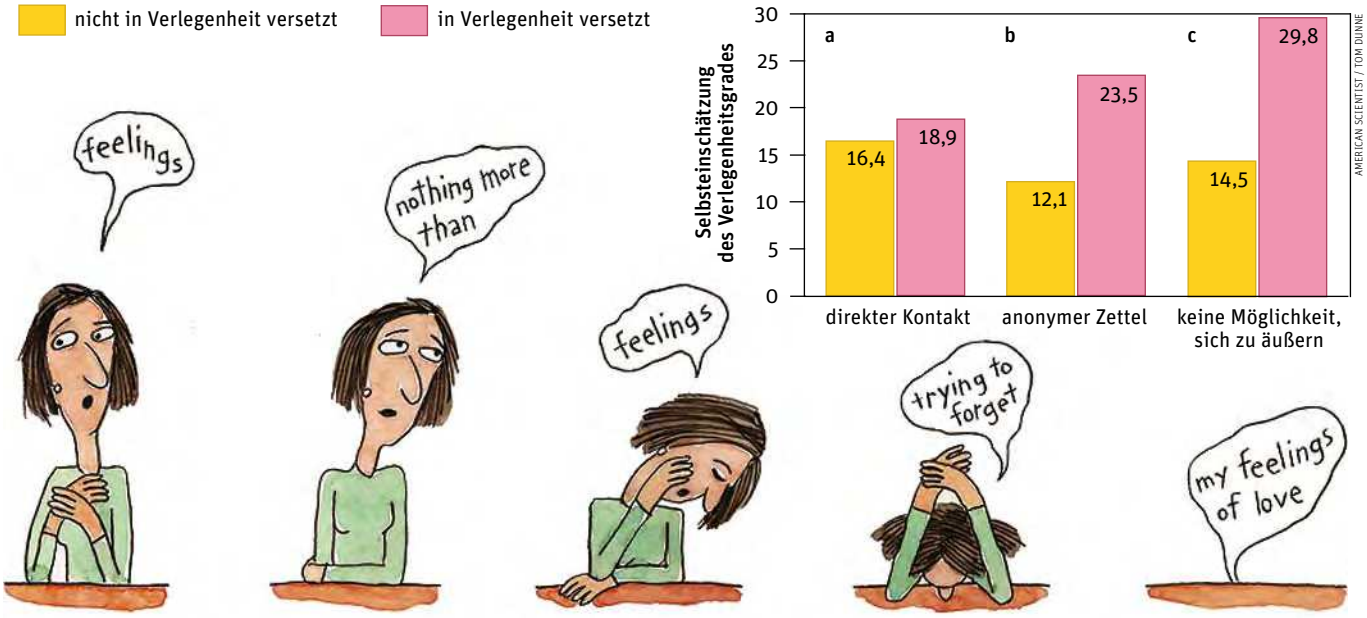
Erröten gilt meist als vorrangiges Anzeichen für Verlegenheit – obwohl Menschen nicht zwangsläufig rot werden, wenn sie peinlich berührt sind, und ob-



▲ **Bei Heiterkeit (oben links) zieht sich der Augenringmuskel zusammen, bei Verlegenheit (oben rechts) nur der Lachmuskel, der Große Jochbeinmuskel.**

▼ **Beim amüsierten Lächeln richtet sich der Blick die ganze Zeit geradeaus, bis das Lächeln erlischt, beim verlegenen Lächeln wendet er sich noch währenddessen schnell ab.**





Wer sich nach einer als peinlich empfundenen Situation darüber äußern kann, bei dem verliert sich die Verlegenheit schneller. In diesem Versuch (von Mark R. Leary) sollten Leute ein Liebeslied vorsingen. Die rosa Balken zeigen die spätere Selbsteinschätzung ihres Verlegenheitsgrads. Teils hatten sie einen Zettel angekreuzt, den der Versuchsleiter gleich ansah (a) oder nicht (b), teils durften sie sich gar nicht äußern (c). Die gelben Balken geben Werte von Kontrollpersonen wieder.

wohl einem das Blut auch aus anderen Gründen ins Gesicht schießt, auch etwa bei andersartiger Erregung. Über die beim Erröten beteiligten physiologischen Vorgänge finden Forscher immer mehr heraus. Ein Test in den USA ermittelte solche Reaktionen von Personen, die im Beisein einiger Fremder Videoaufnahmen von sich selbst anschauten, auf denen sie die amerikanische Nationalhymne vorsangen. Dieses Lied beherrschen die wenigsten.

Konfuse innere Reaktionen

Wie sich herausstellte, beginnt Erröten mit einem abrupten Blutzufluss. Erst danach wird – etwas langsamer – das Gesicht heiß. Zwar bedingt schon die Blutzufuhr den Farbwechsel, doch fühlen wir wohl selbst zuerst die Temperaturzunahme. Das würde bedeuten, dass andere den Vorgang sogar früher bemerken als wir selbst. Einiges spricht dafür, dass Blut- und Temperaturanstieg auf unterschiedlichen Mechanismen beruhen. Zum Beispiel kann die Blockade eines Rezeptors des sympathischen Nervensystems, der beim Erröten mitwirkt, das Phänomen nicht völlig verhindern.

Eigenartig reagieren auch andere Körperfunktionen, wie meine Mitarbeiter und ich feststellten (siehe Bild S. 30). In dem Vorsingtest registrierten wir Blutdruck und Herzschlag: Wir hatten einzelne Probanden beim Singen der amerikanischen Nationalhymne gefilmt, spielten ihnen das nun vor, und mehrere andere Leute schauten dabei zu. Der Blutdruck schoss in der ersten Minute nach oben und stieg auch während der zweiten Minute noch kräftig weiter an. Im Durchschnitt erhöhte sich der systolische (obere) Druck um 16, der diastolische (untere) um 10 Millimeter Quecksilbersäule – ohne körperliche Aktivität ist das viel. In der ersten Minute stieg auch die Herzschlagrate. Doch in der zweiten Minute fiel sie auf den Ausgangswert zurück. Bei Wut, Angst oder Glück pflegen Herzschlag und Blutdruck gleichzeitig zu wechseln. Dass sich beides bei Verlegenheit entkoppelt, könnte eine Besonderheit dieser Emotion sein.

Die äußeren Zeichen von Verlegenheit beim Menschen ähneln in manchem frappierend Beschwichtigungsgebärden von Tieren, die sich dominanten oder wütenden Artgenossen unterwerfen. Dazu gehört oft, den Blick abzuwenden, den Kopf so zu senken, dass der Hals frei liegt, sich klein zu machen, vielfach auch, sich zu kratzen oder selbst zu berühren. Zum Beispiel reagieren Tiere häufig so, wenn das dominante Tier sie anstarrt. Auch Menschen kann ein intensiver Blick verlegen machen. Viele Affen grinsen oder grimassieren in solchen Situationen in auffallender Weise. Bei manchen rötet sich auch die Haut.

Kürzlich äußerten Mark A. Changizi und seine Kollegen vom California Institute of Technology in Pasadena die Idee, das verbesserte Farbsehvermögen mancher Primatengruppen sei womöglich im Zusammenhang mit Erröten und Erblassen entstanden – nämlich zu dem Zweck, Farbwechsel der Haut zu bemerken (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 1/2007, S. 96). Dank ihrer drei Farbsehpigmente nehmen höhere Primaten gut wahr, ob sich das Gesicht verfärbt oder seine Farbe verliert. Auch fällt auf, dass das Gesicht dieser Affen meist höchstens schwach behaart ist.

Ein Hirnzentrum für Verlegenheit kennen die Forscher bisher nicht. Allerdings existieren Hinweise, dass die Stirnrinde, insbesondere die tief gelegene Orbitalregion, dabei mitwirkt, diese Emotion auf Verhaltensweisen im sozialen Kontext zu beziehen. Menschen mit einer Schädigung in dieser Region vermögen zwar vielleicht noch Verlegenheit zu empfinden. Es fällt jedoch auf, dass ihnen Verschiedenes gar nicht peinlich zu sein scheint, was den meisten Leuten unangenehm wäre. Offenbar macht es ihnen nichts aus, Intimitäten und Persönliches zu erzählen. Fremden treten sie oft zu nahe, indem sie diese ungebührlich necken oder aufziehen. Als solche Patienten in einer Studie an der Universität ▷

▷ von Kalifornien in Davis aufgefordert wurden, der Versuchsleiterin einen Spitznamen zu geben, kamen Bezeichnungen wie »Allerliebste«, »Verführerische«, »Beste für die Dunkelheit«. Diesen Patienten fiel es auch recht schwer, Gesichtsausdrücke von Emotionen zu erkennen, die von einem Bewusstsein seiner selbst zeugen, etwa Stolz, Scham, Verlegenheit. Umgekehrt traf es einen Patienten, der wegen eines Tumors im rechten Stirnlappen Krampfanfälle erlitt. Während der Anfälle fühlte er nach eigenem Bekunden stets äußerste Verlegenheit, ganz ähnlich, als hätte er gerade etwas ganz besonders Dummes gesagt.

Ob die Menschen Verlegensein in allen Kulturen genauso erleben, lässt sich nicht leicht überprüfen. Bisherige kulturvergleichende Studien zu Fragen dieser Art stützten sich meist primär auf reine Mitteilungen über Erfahrungen, Gefühle oder Gefühlsäußerungen. Solche Erzählungen müssen nicht immer mit dem tatsächlichen Geschehen übereinstimmen. Außerdem kann man Wörter für Emotionen gar nicht so leicht in andere Sprachen übertragen. Das Englische etwa – auch das Deutsche – unterscheidet Verlegenheit und Scham. Psychologische Forschungen lassen annehmen, dass es sich tatsächlich um separate Gefühlskomplexe handelt. Verlegen wird man eher auf Grund nicht wirklich schlimmer Patzer. So gut wie immer sind dabei andere zugegen. Man schämt sich dagegen bei ernsteren sozialen Verstößen – auch ohne dass andere Menschen anwesend sind. Das deutsche Wort »Peinlichkeit« hat wieder eine etwas andere Konnotation. Im Übrigen lächeln oder grinsen wir normalerweise nicht, wenn wir uns schämen.

Herausgestreckte Zungenspitze

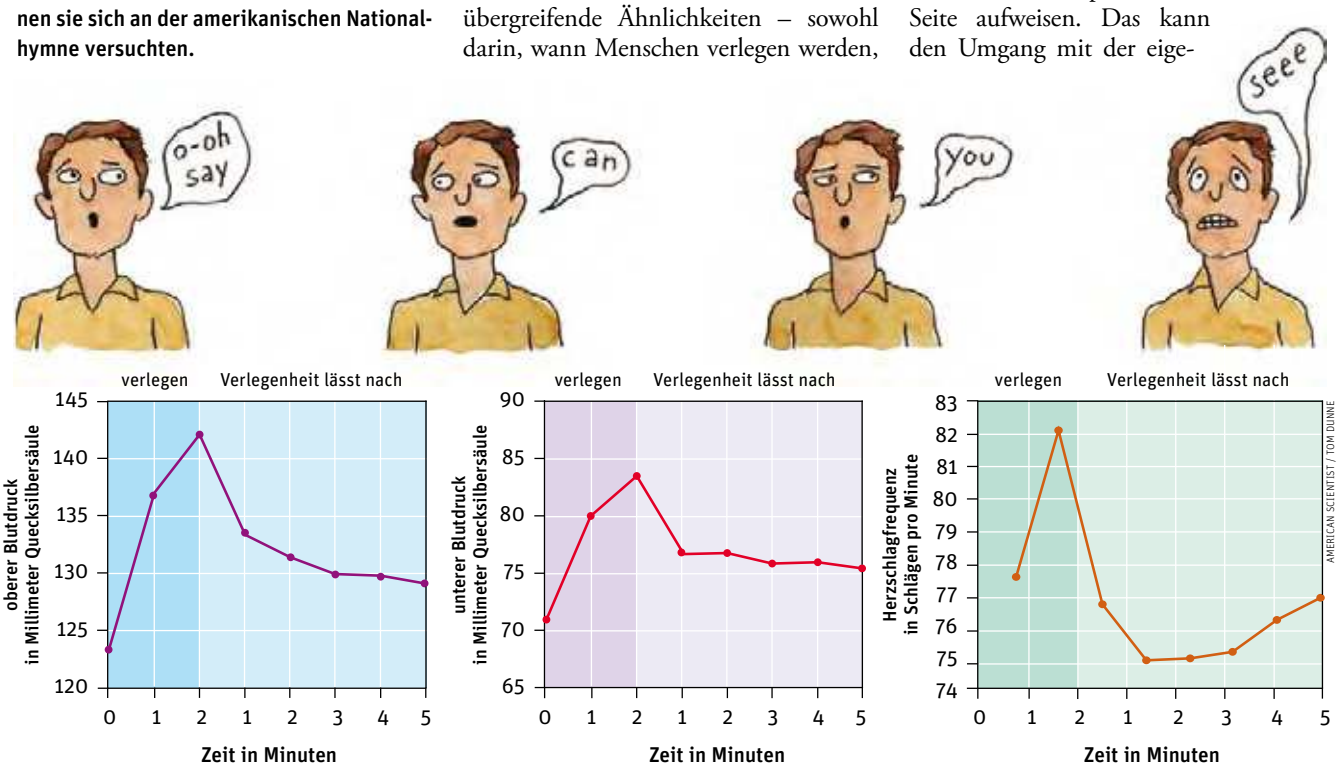
Jedoch sind die Grenzen zwischen den Situationen fließend, in denen wir Scham empfinden oder aus Selbstkritik verlegen werden. Manche Forscher halten diese Art von Verlegenheit daher für eine milde Form von Scham. Viele Kulturen gebrauchen für beides dasselbe Wort. So heißen auf Oriya, der (indogermanischen) Amtssprache des indischen Bundesstaats Orissa, eine Reihe Gemütszustände alle »lajya«, worunter auch unsere Verlegenheit und Scham fällt. Auch viele andere asiatische Sprachen bezeichnen beides gleich. Manche Kulturen Asiens verfügen allerdings über ein reiches Vokabular, solche Vorkommnisse und das Drumherum recht differenziert auszudrücken.

Bei allen Unterschieden fanden Forscher doch auch Anzeichen für kulturübergreifende Ähnlichkeiten – sowohl darin, wann Menschen verlegen werden, als auch darin, wie sich das äußert. Eine Arbeit ergab zum Beispiel, dass es bei iranischen und japanischen Kindern die gleichen Situationen sind – etwa angestarrt werden, sich ausziehen müssen oder kritisiert werden. (In beiden Sprachen kann das Wort für Verlegenheit auch Scham bedeuten.) In einer anderen Arbeit bewerteten Inder und US-Amerikaner verschiedenste Gesichtsausdrücke auf Fotos. Die Einstufung von Verlegenheit war im Wesentlichen gleich. Angehörige beider Länder beschrieben dazu auch ähnlich geartete mögliche Hintergrundsituationen. Doch einen Unterschied gab es: Die Inder bewerteten als Zeichen von verlegen sein, wenn jemand sich auf die herausgestreckte Zungenspitze »biss«, wie sie das nannten. Das gilt vielerorts in Südostasien als Besänftigungsgeste, die man bei einem sozialen Lapsus oder einer Entgleisung zeigt.

Ob es Geschlechtsunterschiede bei dieser Emotion gibt, darin widersprechen sich die vorliegenden Studien. Sofern sie voneinander abwichen, ergab sich fast immer, dass Frauen leichter in Verlegenheit zu geraten scheinen als Männer. In der erwähnten Studie Sabinis fanden Frauen allerdings nur Benimm-Ausrutscher peinlicher.

Die unangenehmen Empfindungen bei Verlegenheit im sozialen Kontext mögen zwar ihr Gutes haben, können aber auch eine potenziell verheerende Seite aufweisen. Das kann den Umgang mit der eige-

Herzschlag und Blutdruck reagieren bei Verlegenheit nicht gleichförmig. Hier sahen sich Probanden Filme an, auf denen sie sich an der amerikanischen Nationalhymne versuchten.



nen Gesundheit betreffen, aber auch so manche andere Alltagssituation. Offenbar nehmen viele Menschen, um nur ja nicht in Verlegenheit zu kommen, für sich – und auch für andere – teils hohe Risiken in Kauf, deren Folgen bei nüchterner Betrachtung viel schwerer wiegen würden als ein bisschen Verlegenheit oder erlebte Geringschätzung.

John Sabini meint sogar, dies erkläre in den meisten Fällen auch, warum Zeugen bei Unfällen oder Überfällen so oft nicht zur Hilfe kommen – ein Phänomen, das Sozialpsychologen seit Langem Rätsel aufgibt. Die Leute befürchteten sich zu blamieren, wenn sie versuchen, Hilfe zu leisten. Man möchte nicht dumm dastehen, wenn man etwa am Strand Alarm schlägt oder selbst einen Rettungsversuch unternimmt, nur weil jemand draußen im Wasser komisch zappelt und schreit. Vielleicht albert die vermeintlich bedrohte Person ja nur herum. Im Vergleich zu einem Menschenleben sind die Kosten für einen falschen Alarm oder ein übereiltes Einschreiten gering – doch offenbar zögern wir damit, manchmal zu lange.

»Tina, wat kosten die Kondome?«

Das Bestreben, Peinlichkeiten zu vermeiden, kann so überhandnehmen, dass Menschen erhebliche Gesundheitsgefahren für sich und andere riskieren. So haben nachweislich unsichere Sexualpraktiken hier eine wesentliche Ursache. Vor allem Teenager und junge Erwachsene bringen es oft nur schwer über sich, Kondome zu kaufen und zu benutzen. Laut einer Umfrage von Darren W. Dahl von der Universität von British Columbia in Vancouver (Kanada) und seinen Kollegen gaben 64 Prozent der Personen an, der Kauf von Kondomen sei ihnen mehr oder weniger unbehaglich oder sie genierten sich. Fast jeder gestand, dass er den Erwerb irgendwie zu verschleiern versuche oder lieber ein Geschäft aufsuche, wo ihn keiner kennt.

Selbst Krebsvorsorgeuntersuchungen meiden viele Menschen laut Erhebungen der letzten Jahre, weil ihnen die Maßnahme peinlich oder unangenehm ist. Doch reichen die psychischen Hintergründe für unkluges Verhalten in medizinischer Hinsicht viel weiter und sind fassettenreicher. Das ergaben differenziertere anonyme Befragungen, die meine Mitarbeiter und ich mit fast 400 Erwachsenen durchführten.

Generell gaben 57 Prozent der Teilnehmer an, Angst vor der Peinlichkeit habe sie schon vom Arztbesuch abgeschreckt, obwohl sie befürchteten, es könne sich um etwas Ernstes handeln. In diese Gruppe fielen auch 20 Prozent, die notwendige Routineuntersuchungen aufschoben. Vermutlich sind die Zahlen noch zu niedrig. Menschen »vergessen« solche Vorfälle. Sie spielen auch eigene Unvernunft gern herunter.

Ein volles Drittel der Befragten gestand, schon einmal mit medizinischen Symptomen, die ihnen durchaus Sorge bereiteten, keinen Arzt aufgesucht oder den Besuch zumindest hinausgezögert zu haben, weil sich die Sache ja als banal hätte erweisen können. Dann hätte man doch dumm dagestanden. Jede Fünfte dieser Personen hatte sich öfter als einmal so verhalten. Meistens handelte es sich um Brustschmerzen und Ähnliches, also mögliche Anzeichen für ein Herzleiden. Angesichts der modernen medizinischen Möglichkeiten wäre demnach mancher diesbezügliche Krankheits- oder Todesfall vermutlich vermeidbar.

In der Befragung bekannten signifikant mehr Frauen als Männer, dass die Angst vor Peinlichkeit sie schon von einem Arztbesuch abgehalten habe. Liegt das daran, dass sie im Allgemeinen mehr potenziell genierliche Untersuchungen über sich ergehen lassen müssen, etwa beim Frauenarzt?

Wie wir feststellten, kann bereits das Gespräch mit dem Arzt und sogar mit dem medizinischen Hilfspersonal über die Beschwerden eine Hemmschwelle darstellen, die viele Frauen heftiger empfinden und mehr zu meiden versuchen als Männer. Die Frauen fürchteten sich auch eher vor der Blamage, dass sich die Symptome als harmlos herausstellen könnten. Übrigens neigten Menschen mit niedrigem Einkommen aus Furcht vor Verlegenheit stärker zu solchem Leichtsinn als Besserverdienende.

Es ist schon erschreckend, dass sich viele Menschen wissentlich so unvernünftig verhalten. Merkwürdigerweise glauben wir oft, Verlegenheit mache fast nur uns allein stark zu schaffen. Aber wir betrügen uns auch gern selbst: Wir gestehen uns meist nicht ein, wie stark uns solche Ängste beherrschen. Dabei handelt es sich keineswegs um verdrängte innere Konflikte im Freud'schen Sinn. Im Gegenteil scheinen es Menschen sehr deutlich zu spüren, wenn sie sich von sozialen Situationen manipulieren lassen. Um bei Sozialkontakten den Schein zu wahren, nehmen wir beträchtliche Risiken in Kauf.

CHRISTINE HARRIS

Sich auf die Zunge zu beißen ist für Inder wie für viele Südostasiaten bei Verlegenheit typisch.

Verlegenheit entwickelte sich wahrscheinlich im sozialen Kontext als Regulativ zum Wohl des Betroffenen. Oft mögen die unangenehme Empfindung und die große Angst vor ihr segensreich sein. Leider aber verhalten wir uns gerade derentwegen auch manches Mal höchst unvernünftig. ◁

Christine R. Harris ist außerordentliche Professorin für Psychologie an der Universität von Kalifornien in San Diego. Dieser Artikel ist eine gekürzte Fassung der englischen Originalversion.

© American Scientist / www.americanscientist.org/IssueTOC/issue/902

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE

Bare skin, blood, and the evolution of primate color vision. Von M. A. Changizi et al. in: Biology Letters Bd. 2, S. 217, 2006

Cardiovascular responses of embarrassment and effects of emotional suppression in a social setting. Von C. R. Harris in: J. Personality and Social Psychology, Bd. 81, S. 886, 2001

Self-conscious emotions. Von M. Lewis in: American Scientist, Bd. 83, S. 68, 1995

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/869368.

Gegenwind aus dem Schwarzen Loch

Obwohl kleiner als unser Sonnensystem, prägen gigantische Schwarze Löcher das Schicksal riesiger Galaxienhaufen, in deren Zentren sie sitzen. Durch gewaltige Teilchenwinde behindern die kosmischen Mahlströme neue Sterngeburten.

Von Wallace Tucker, Harvey Tananbaum und Andrew C. Fabian

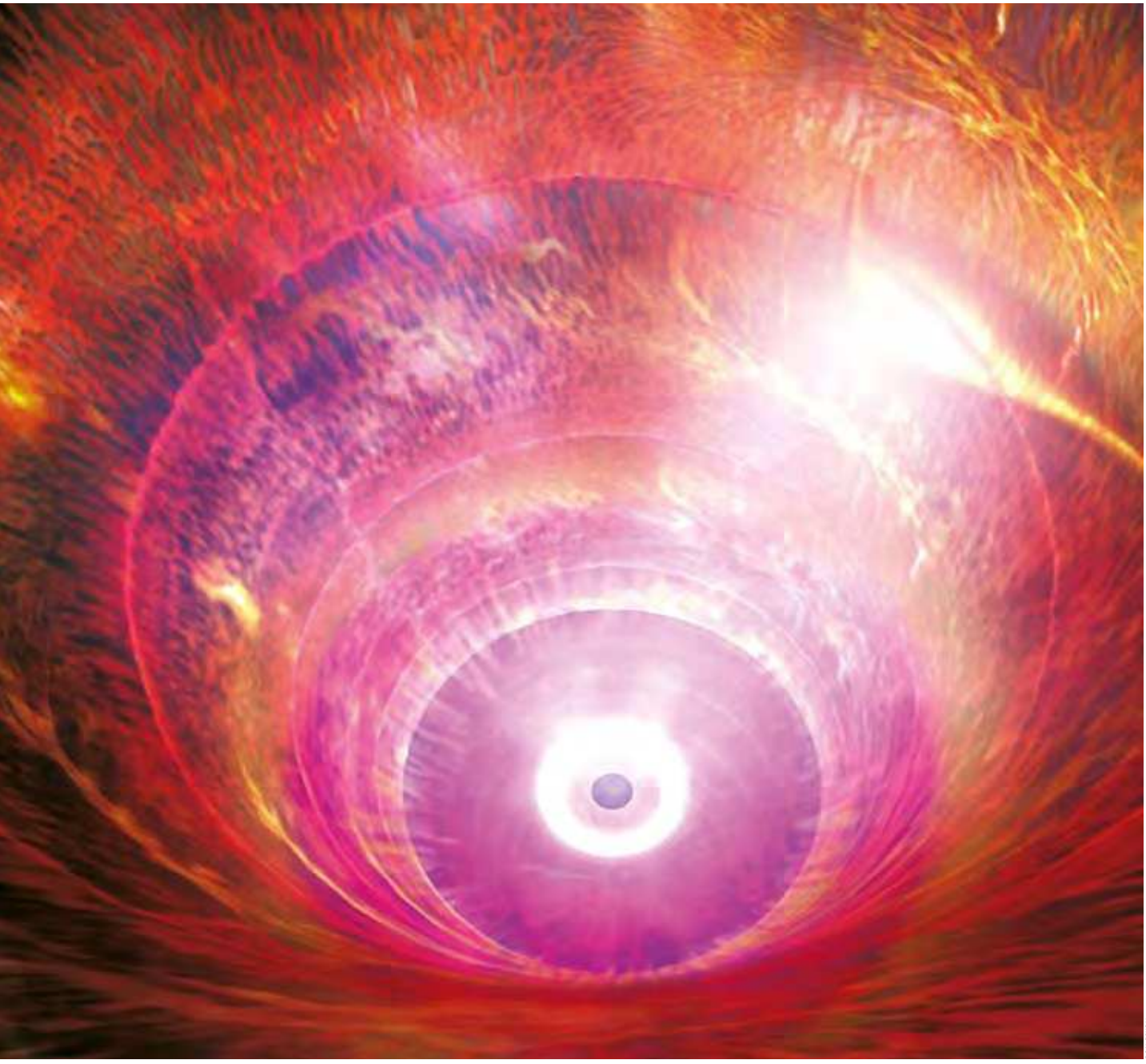
Auf den ersten Blick ähnelt das Muster der großräumigen Strukturen im Kosmos der Karte eines Straßennetzes. Galaxien reihen sich entlang filamentartigen Strukturen auf, die das Universum kreuz und quer durchziehen. Zwischen diesen galaktischen »Autobahnen« liegen Regionen mit deutlich geringerer Materiedichte, die kosmischen Leerräume. Es gibt sogar galaktische Autobahnkreuze: Wo mehrere Filamente aufeinandertreffen, liegen Galaxienhaufen.

Die Haufen sind riesig. Von der Erde zum Mond benötigt das Licht kaum mehr als eine Sekunde, bis zur Sonne acht Minuten. Zum Zentrum unserer Galaxis ist es immerhin bereits 25 000 Jahre lang unterwegs. Doch selbst das ist wenig im Vergleich zu der Zeit, die ein Lichtstrahl benötigt, um einen typischen Galaxienhaufen zu durchqueren: etwa zehn Millionen Jahre. Damit sind dies im Universum die größten durch die Schwerkraft gebundenen Objekte. Filamente sind zwar noch größer, haben sich jedoch nicht von der kosmischen Expansion gelöst (siehe SdW 4/2007, S. 32).

In einem Haufen stehen die Galaxien und die andere Materie in einem dynamischen Gleichgewicht. Zwar bewegen sich die Welteninseln, doch die Dunkle Materie hindert sie daran zu entkommen.

Schicksalhafte Wechselwirkung

Auch siebzig Jahre nach ihrer Entdeckung ist deren Wesen noch immer rätselhaft (siehe SdW 10/2003, S. 44). Die Galaxien, das Gas des Haufens und diese völlig unsichtbare Materie, die sich



DON DIXON

Nicht zur Nachahmung empfohlen: Blick in den gebündelten Materiestrahl (»Jet«) eines massereichen Schwarzen Lochs. Solche Objekte setzen eine Energie frei, die Millionen oder gar Milliarden von Supernova-Explosionen entspricht.

allein durch ihre Schwerkraft bemerkbar macht, beeinflussen sich gegenseitig. Daraus resultieren komplexe Phänomene, die Astronomen allmählich enträtseln.

Galaxienhaufen sind mehr als die Summe ihrer Teile. Globale Prozesse können darin Ereignisse auf sehr viel kleinerem Raum steuern, zum Beispiel das Wachstum der Galaxien oder die Versorgung massereicher Schwarzer Löcher in den galaktischen Zentren. Umgekehrt beeinflussen lokale Vorgänge einen ganzen Haufen. So schleudern Schwarze Löcher große Materiemengen mit hoher Geschwindigkeit aus ihren Galaxien heraus. Für die Entwicklung des gesamten Haufens ist das folgenreich.

Warum sollen großräumige und kleinräumige Prozesse etwas miteinander zu tun haben? Schließlich sind auch große Schwarze Löcher immer noch kleiner als das Sonnensystem. Dass sie einen ganzen Galaxienhaufen beeinflussen, ist so, als würde eine Erbse auf die gesamte Erde einwirken. Doch immerhin scheint dies einige schwierige Probleme zu lösen, über denen Astronomen schon lange brüten. Eines davon betrifft die so ge- ▷

nannten Kühlströmungen *(cooling flows)*. Seit Längerem wissen wir, dass ein viele Millionen Grad heißes, ionisiertes Gas – ein Plasma – im Haufen den Raum zwischen den Galaxien ausfüllt und Röntgenstrahlung aussendet. Die Gesamtmasse dieses Plasmas ist größer als die Masse aller Sterne in allen Galaxien des Haufens. Seine hohe Temperatur beruht auf dem allmählichen gravitativen Kollaps des Haufens im Verlauf der kosmischen Strukturbildung.

Da kosmische Röntgenstrahlung nicht die irdische Atmosphäre durchdringt, gelang es erst mit Röntgenteleskopen im Weltraum, das heiße Gas zu entdecken. Bereits die ersten Beobachtungen vor zwanzig Jahren machten deutlich, dass die intensive Röntgenstrahlung dem Gas so viel Energie entziehen müsste, dass es abkühlen und sich im Zentrum des Haufens ansammeln sollte, wo es eine besonders massereiche Galaxie gibt – daher stammt der Begriff »Kühlströmung«. Einer von uns (Andrew Fabian) leitete damals eine Arbeitsgruppe, die sich mit dem Satelliten Einstein und dem deutsch-amerikanischen Röntgenobservatorium Rosat auf die Suche nach diesen Gasströmen machte. Den Berechnungen zufolge müssten die vermuteten Kühlströmungen dramatische Konsequenzen haben. Dauerten sie eine Milliarde Jahre an, sollten aus dem Gas im Zentrum des Haufens Billionen neuer Sterne entstehen.

Doch niemand entdeckte solche jungen Sterne, und auch von den erwarteten großen Mengen kühlen Gases fehlte jede Spur. Hätte ein zentrales Schwarzes Loch Sterne und Gas geschluckt, müsste es die billionenfache Masse der Sonne enthalten – weit mehr als alle bekannten Schwarzen Löcher. Einer von uns (Wallace Tucker) schloss daraus, großräumige, lang andauernde Kühlströmungen könnten gar nicht existieren.

Das heiße Gas der Haufen bewahrt über Milliarden von Jahren die Spuren einer dramatischen Vergangenheit

Möglich schien, dass starke Energieausbrüche in der Zentralgalaxie das Gas des Haufens so stark aufheizen, dass es selbst die Röntgenstrahlung nicht schafft, es wieder abzukühlen. Längst wissen Radioastronomen von der Existenz solcher Ausbrüche, doch reicht deren Energie aus, um in einer größeren Region die Kühlströmungen zu unterbinden? So blieb das Problem bestehen: Erhitztes Haufengas müsste abkühlen, doch niemand konnte das kühle Gas aufspüren.

Das Rätsel der »fehlenden« Gaskühlung zu lüften, war eine der wichtigsten Aufgaben für den Nasa-Röntgensatelliten Chandra und das Esa-Observatorium XMM-Newton. Beide wurden 1999 in die Erdumlaufbahn gebracht. Genauere Röntgenbeobachtungen sind nützlich, weil das heiße Gas der Galaxienhaufen gewissermaßen ein gutes Gedächtnis hat. Es kühlt nur langsam ab und bewahrt über Milliarden Jahre die Spuren energiereicher Prozesse. So enthält es die chemischen Elemente, die Supernova-Explosionen aus den Galaxien getrieben haben, und behält ihre charakteristische spektrale Energieverteilung. Dank der neuen Teleskope wurden Astronomen zu Archäologen des intergalaktischen Raums und können das Schicksal der Haufen rekonstruieren.

Der hellste Galaxienhaufen am Röntgenhimmel liegt im Sternbild Perseus. Dieses Objekt leuchtet nicht nur sehr hell, sondern gehört mit einer Entfernung von 300 Millionen Lichtjahren gerade noch zur kosmischen Nachbarschaft der Milchstraße. Mit dem Satelliten Rosat war es bereits in den 1990er Jahren gelungen, im Haufenzentrum zwei große Regionen mit verminderter Röntgenstrahlung auszumachen. Diese »Röntgenlöcher« erinnerten die Forscher an die Gestalt einer Sanduhr, in deren Mitte die Riesengalaxie NGC 1275 sitzt, die Heimat der Radioquelle Perseus A.

Monsterblasen und Geisterlöcher

Mit Chandra gelang es Fabian und seinen Kollegen, weitere Einzelheiten aufzulösen. So scheinen die Röntgenlöcher auf derselben Achse zu liegen wie die schon zuvor beobachteten, strahlartigen Radioquellen (»Jets«), die vom Zentrum der Galaxie ausgestoßen werden (siehe Bild rechts). Die Löcher sind nicht völlig leer, sondern enthalten Magnetfelder und energiereiche Teilchen wie Protonen und Elektronen, was Radiobeobachtungen verraten. Diese energiereichen Regionen niedriger Dichte steigen wie Blasen aus der Galaxie und verdrängen dabei das heiße, die Röntgenstrahlung emittierende Gas.

Auch in anderen Galaxienhaufen gibt es solche Strukturen. Mit Chandra konnten diese auch in Hydra A, Herkules A und Abell 2597 aufgespürt werden. Auch sie fallen mit Radiojets zusammen. Außerdem stießen Astronomen auf Blasen, die nur wenig Radio- und Röntgenstrahlung aussenden. Vermutlich haben die darin befindlichen Teilchen den Großteil ihrer Energie bereits abgestrahlt. Diese »Geisterlöcher« haben sich von den Zentralgalaxien gelöst; vielleicht sind es die Reste einer seit Langem erloschenen Aktivität des Schwarzen Lochs.

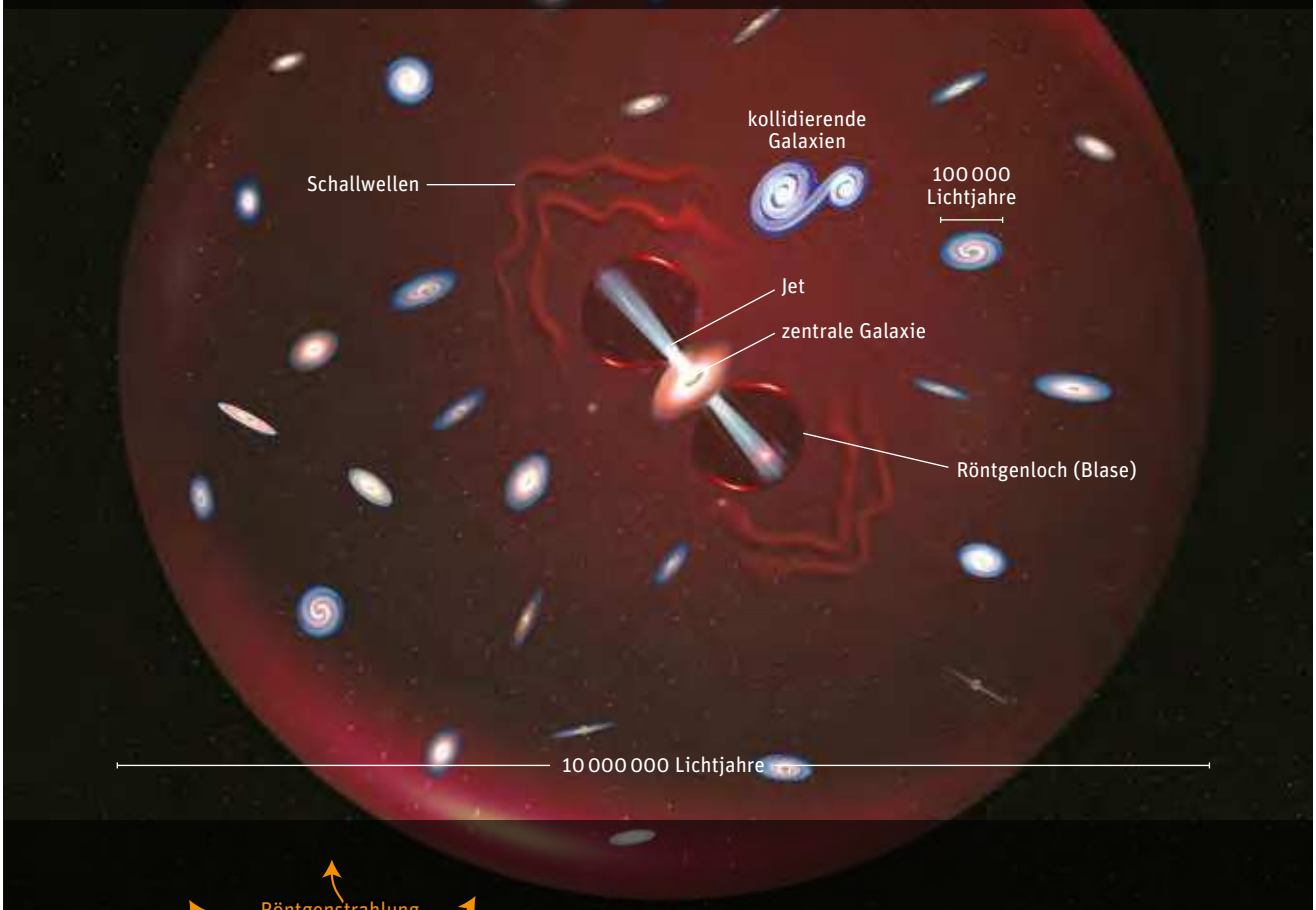
Das bislang spektakulärste Beispiel hat Brian R. McNamara, derzeit an der Universität von Waterloo (Kanada), in dem Haufen MS 0735.6+7421 (kurz: MS 0735) aufgespürt. Zwar zeigen Auf-

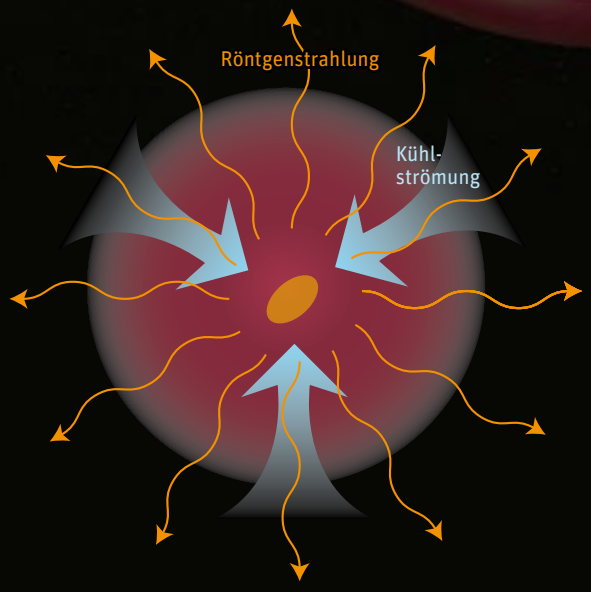
In Kürze

- Im Zentrum von Galaxienhaufen entdeckten Astronomen gewaltige Blasen, die mit energiereichen Teilchen angefüllt sind und Hunderttausende von Lichtjahren durchmessen. Um sie zu erzeugen, bräuchte man die Energie von mehr als hundert Millionen **Supernova-Explosionen**.
- Nur massereiche Schwarze Löcher kommen als Verursacher in Frage. Nähert sich magnetisiertes, heißes Gas der **rotierenden Akkretionsscheibe** des kosmischen Mahlstroms, wachsen elektromagnetische Kräfte stark an und katapultieren einen Teil des Gases in einem eng gebündelten Strahl (»Jet«) nach außen.
- Diese Jets erzeugen nicht nur die Blasen, sondern heizen auch das intergalaktische Gas auf und transportieren Magnetfelder hinein – das Ganze ist Teil eines Aktivitätszyklus, der das **Wachstum der Riesengalaxien** im Zentrum der Haufen reguliert.

Anatomie eines Galaxienhaufens

Als grösste Objekte im Universum enthalten Galaxienhaufen Tausende von Welteninseln, die in einem Ball aus heißem Gas (rot) umherschwirren wie Mücken in einem Schwarm. Die Schwerkraft der sichtbaren, baryonischen Materie sowie der Dunklen Materie hält den Haufen zusammen und verhindert, dass Galaxien entkommen. In den Zentren der meisten dieser Strukturen befinden sich besonders große Galaxien – dort finden die energiereichsten Prozesse im heutigen Universum statt.





Durch die Emission von Röntgenstrahlung verliert das Haufengas Energie. Es müsste abkühlen und nach innen strömen. Über Jahrmilliarden sollten daraus Billionen neuer Sterne entstehen. Doch es sind nur wenige solcher Sterne zu finden.

Zyklen der Aufheizung und der Abkühlung erklären, warum es diese Sterne nicht gibt. Die Jets der Schwarzen Löcher führen dem Haufengas Energie zu und halten so den nach innen gerichteten Gasstrom auf.

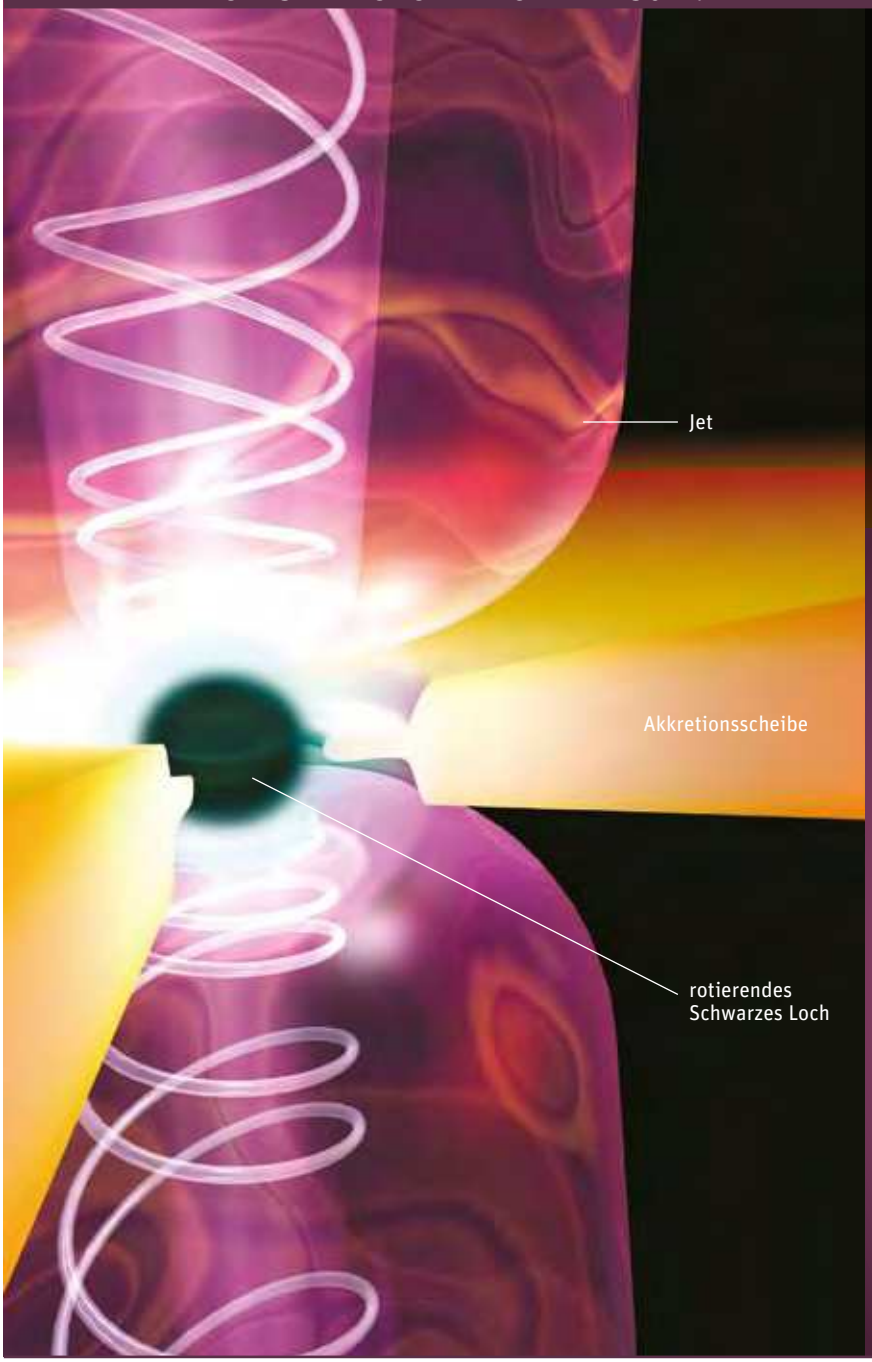
GRAFIK OBEN: ALFRED T. KAMAJIAN; GRAFIKEN UNTEN: JANA BRENNING

▷ nahmen dieses weit entfernten Objekts weniger Einzelheiten als solche des Perseus-Haufens, doch sie erzählen uns eine erstaunliche Geschichte. Der Durchmesser der beiden Röntgenlöcher beträgt jeweils 600 000 Lichtjahre – damit sind sie sechsmal so groß wie die Scheibe unserer Milchstraße! Der Größe sowie der gemessenen Dichte und Temperatur des Gases in ihrer Umgebung zufolge sind diese Strukturen etwa 100 Millionen Jahren alt. Um sie hervorzubringen, war eine Gesamtenergie erforderlich, die zehn Milliarden Supernova-Explosionen entspricht. Als Astronomen sind wir es zwar gewohnt, täglich mit unvorstellbar großen Zahlen zu arbeiten, doch hier waren auch wir erst einmal sprachlos.

Die erstaunliche Energiemenge erklärt, warum niemand die Kühlströmungen nachweisen konnte. Mit Hilfe von Röntgenspektren, die sie mit dem XMM-Teleskop aufgenommen hatten, wiesen John R. Peterson von der Purdue-Universität in West Lafayette (Indiana) und seine Kollegen nach, dass Haufen keine Kühlströmungen enthalten, wenn darin derartige Blasen existieren. Diese scheinen zu verhindern, dass sich das Gas abkühlt. Doch ein Beweisschritt fehlt: Wie gelangt die Energie von der Blase in das Gas?

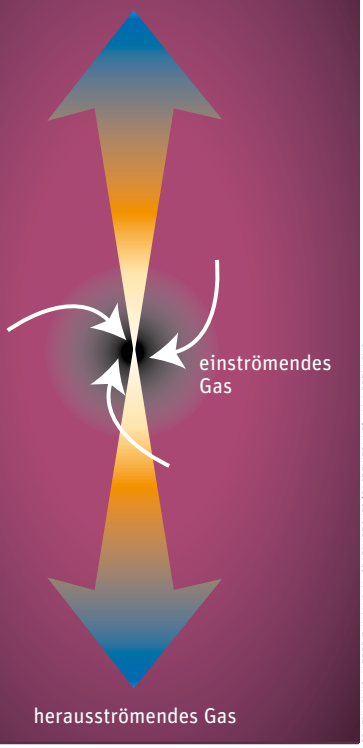
Denkbar wäre, dass die Blasen Stoßwellen auslösen, so wie wir es von Explosionen auf der Erde kennen. Bewegt sich die nach außen geschleuderte Materie mit Überschallgeschwindigkeit durch die Luft, erzeugt sie mit hohem

Der kraftvollste Motor im Universum?



Schwarze Löcher saugen nicht nur Materie auf. Zugleich sind sie Motoren, die Rotationsenergie in eine linear gerichtete Bewegung umwandeln können. Das einfallende Gas überträgt seinen Drehimpuls auf das Schwarze Loch, dadurch bewegt sich dessen äußere Grenze nahezu mit Lichtgeschwindigkeit. Das Magnetfeld des Schwarzen Lochs bündelt dann einen Teil der einfallenden Materie in einem nach außen gerichteten Strahl (»Jet«). Ein schnell rotierendes Schwarzes Loch schleudert auf diese Weise etwa ein Viertel der einfallenden Materie wieder heraus, den Rest verschlingt es.

Gasbewegung



GRAFIK LINKS: ALFRED T. KAMAJAN; GRAFIK RECHTS (GASBEWEGUNG): JANA BRENNING

Druck eine dünne Wellenfront. Darin wird ein Teil der Bewegungsenergie durch Zusammenstöße zwischen den Molekülen in Hitze umgewandelt. Das scheint auch bei Supernova-Explosionen zu passieren.

Dass dieser einfache Prozess das Haufengas erhitzt, liegt nahe – und doch spielt er offenbar keine Rolle, denn sonst müssten in den Haufen heiße, dünne Schichten existieren, die wir auf unseren hoch aufgelösten Röntgenbildern sehen sollten. Darauf gibt es aber keinen Hinweis. Hinzu kommt, dass Stoßwellen wohl nur die Zentralregion des Haufens aufheizen könnten – weiter außen verhindern sie die Abkühlung nicht.

Schallwellen sind vermutlich eher dazu in der Lage, Energie in den intergalaktischen Raum zu transportieren. Dort ist das Gas nach irdischen Maßstäben zwar außerordentlich stark verdünnt – pro Kubikmeter enthält es nur wenige tausend Atome. Dennoch können sich Schallwellen darin ausbreiten und Stoßwellen hervorbringen, die sich etwas schneller ausbreiten als der Schall und so das Gas allmählich erhitzen.

Fabian und seine Mitarbeiter stießen in Röntgenaufnahmen des Perseus-Haufens auf Hinweise für diese Idee: eine Reihe von nahezu konzentrischen Ringen im Haufengas. Dichte und Druck des Gases ändern sich am innersten Ring sprunghaft, während die Temperatur dort gleich bleibt. Genau diese Merkmale erwartet man von einer schwach ausgeprägten Stoßwelle. In den äußeren Ringen sind Dichte und Druck dagegen fast konstant, es handelt sich hier wohl um Schallwellen. Aus der Schallgeschwindigkeit im intergalaktischen Gas (1170 Kilometer pro Sekunde) und dem Abstand der Wellen (35 000 Lichtjahre) folgt, dass diese nach jeweils etwa zehn Millionen Jahren entstanden. Die Tonhöhe der Schallwellen entspricht der Note B – allerdings um 57 Oktaven tiefer gesetzt als das hohe C.

Ähnliche Strukturen wurden auch im Virgo-Haufen entdeckt, der nur etwa 50 Millionen Lichtjahre von unserer Milchstraße entfernt ist. William Forman vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge (Massachusetts) und seine Kollegen beobachteten mit Chandra die Region um dessen Zentralgalaxie Messier 87. Sie entdeckten ein Netz von Filamenten, die jeweils etwa 1000 Lichtjahre dick und 50 000 Lichtjahre lang sind.

Wie die Wellen im Perseus-Haufen könnten sie von Schallwellen erzeugt worden sein, womöglich durch eine Folge aufsteigender Blasen von Ausbrüchen, zwischen denen etwa sechs Millionen Jahre vergingen. Auf Grund dieses kürzeren Intervalls liegt die Tonhöhe der Schallwellen etwa eine Oktave höher als im Perseus-Haufen. Außerdem fanden Forman und seine Mitarbeiter einen Ring heißeren Gases mit einem Radius von 40 000 Lichtjahren – vermutlich eine Stoßfront – sowie ein großes Röntgenloch in einer Entfernung von 70 000 Lichtjahren vom Galaxienzentrum.

Energie aus dem Mahlstrom

Wie kann die Energie der Schallwellen das Gas aufheizen? Dass im Perseus-Haufen die Temperatur der Wellen nicht über die vermutete Stoßfront hinaus ansteigt, könnte der Schlüssel zur Erklärung sein. Vielleicht kann die Wärmeleitung die Energie des aufgeheizten Gases effektiv ableiten. Denkbar ist ebenso, dass hochenergetische Elektronen aus den Blasen oder aus anderen Bereichen innerhalb der Wellen das Gas aufheizen. Auch so würde die Stoßfront abkühlen.

Schallwellen erhitzen das intergalaktische Gas – ihr Ton liegt 57 Oktaven unter dem hohen C

Besonders rätselhaft ist für uns jedoch, wie die Blasen überhaupt entstehen können. Angesichts der enormen Energien kommt nur eine Klasse von Objekten als Urheber in Frage: massereiche Schwarze Löcher. Mögen diese zwar gemeinhin als effiziente Fallen für alle Arten von Materie gelten, können sie diese auch mit großer Geschwindigkeit in gebündelten Strahlen wieder ausschleudern. Erst seit ein paar Jahren gibt es plausible Ideen, wie es dazu kommt.

Simulationen zeigen, dass ein Schwarzes Loch als riesiger, rotierender Motor wirken kann. Fällt Gas ein, dreht es sich schneller, weil der Gesamtdrehimpuls konstant bleibt. Magnetfelder können Rotationsenergie in eine geradlinige Bewegung umwandeln und einen Teil der Materie herauskatapultieren. Bereits 1977 erkannten Roger Blandford und Roman Znajek von der Universität Cambridge, dass dies ein wirkungsvoller Mechanismus sein könnte. Ein rotierendes Schwarzes Loch verzerrt in seiner Nähe auch die Geometrie der Raumzeit, was dem Magnetfeld im Bereich des einfallenden Gases eine trichterförmige Struktur aufzwingt. Daraus resultiert ein elektromagnetischer »Tornado«, der elektrisch geladene Teilchen in zwei entgegengesetzten Strahlen nach außen schleudert. Langsam rotierende Schwarze Löcher erzeugen nur schwache Jets. Sie verschlucken den Großteil des einfallenden Gases und lassen ihn für immer verschwinden. Schnell rotierende stoßen dagegen etwa ein Viertel des einfallenden Gases über die Jets wieder aus.

Der Zustrom von Materie lässt die Schwarzen Löcher in den Galaxienzentren immer schneller rotieren. Ist ihre Masse durch den Einfall deutlich angestiegen, sollte die äußere Grenze beinahe mit Lichtgeschwindigkeit rotieren. Doch wie viel Gas auch immer einströmt: Einsteins Relativitätstheorie zufolge wird die Lichtgeschwindigkeit nie erreicht. Mit jedem weiteren Gasklumpen, der in das Schwarze Loch stürzt, nimmt die Rotationsgeschwindigkeit immer weniger zu.

Dank neuer Beobachtungstechniken gelang es Astronomen, in einigen Galaxien die Rotationsgeschwindigkeit der zentralen Schwarzen Löcher abzuschätzen. Viele von ihnen drehen sich tatsächlich schnell genug, um eindrucksvolle Jets hervorzubringen. Doch selbst deutlich masseärmere Schwarze Löcher, die anstatt von Millionen lediglich ein Dutzend Sonnenmassen enthalten, können Jets aus energiereichen Teilchen erzeugen, die sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegen und in ihrer Umgebung das Gas aufheizen.

Berechnungen zufolge bestehen diese Jets aus zwei Komponenten: einem Materiestrom, der sich mit einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit bewegt und die äußere Hülle des Trichters bildet, sowie einem verdünnten Gasstrom aus extrem energiereichen Teilchen, die nahezu exakt entlang der Trichterachse herausschnellen. Diese innere Komponente transportiert den weitaus größten Anteil der Energie und erzeugt die eindrucks- ▷

vollen Strukturen, die Astronomen im Radio- und Röntgenbereich beobachten.

Dass die inneren Komponenten oft über Hunderttausende von Lichtjahren gebündelt bleiben und weit über die Grenzen ihrer Ursprungsgalaxien hinausreichen, verblüfft besonders. Auf diesen langen Distanzen scheinen die Jets kaum Energie zu verlieren. An seinem Ursprung nahe dem Schwarzen Loch kann der Gasdruck den Strahl stark bündeln. Vielleicht sorgt die Massenträgheit dafür, dass dieser anschließend fokussiert bleibt – wie bei einem Wasserstrahl, der aus einem Schlauch hervorschießt, oder Wasserdampf, der unter hohem Druck aus der Öffnung eines Teekessels zischt. Auch das Magnetfeld, das mit dem Materiestrom aus den Galaxien dringt, könnte diesen bündeln.

Was auch immer die Jets zusammenhält: Allmählich fordert der Druck des Gases, das sie durchqueren, seinen Tribut. Sie verlangsamen sich, fächern auf und erzeugen schließlich riesige magnetisierte Wolken aus hochenergetischen Teilchen. Diese Wolken expandieren weiter und schieben dabei das umgebende Gas vor sich her – so entstehen die dunklen Röntgenlöcher, die Astronomen mit Chandra beobachten.

Der Einfall von Gas in ein rotierendes Schwarzes Loch, Jets, die nach außen schnellen und dabei riesige Blasen erzeugen, welche energiereiche Teilchen enthalten, und so das intergalaktische Gas in einem riesigen Volumen aufheizen: Das ist ein Feed-back-Mechanismus von wahrlich kosmischer Dimension. Das Schwarze Loch reagiert mit seiner Aktivität auf globale Ereignisse im Haufen und beeinflusst diese wiederum.

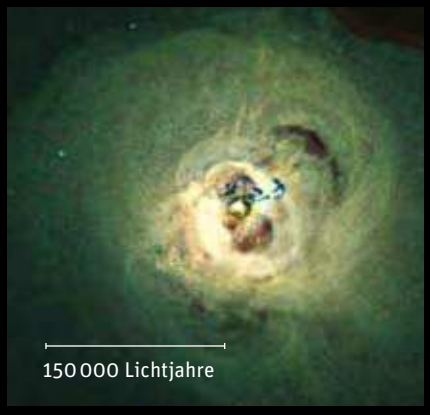
Wachstum in Schüben

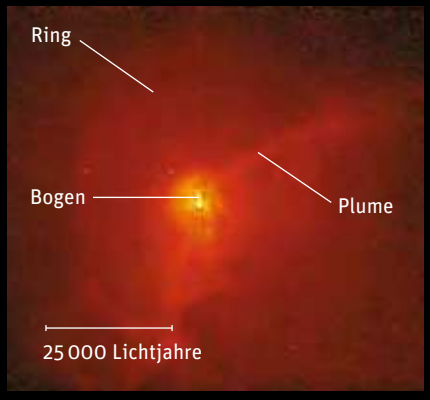
Doch was hat diesen Prozess in Gang gesetzt? Vermutlich war das Gas im Haufen bereits recht früh in der Geschichte des Kosmos heiß, während das massereiche Schwarze Loch in der großen zentralen Galaxie noch ruhig war. Im Verlauf von 100 Millionen Jahren kühlt das Gas im Innenbereich des Haufens ab und gelangt als Kühlströmung in die Zentralgalaxie. Ein Teil dieses Gases wird dort in Sterne umgewandelt, der Rest fällt weiter bis zum Schwarzen Loch, um das es sich in einer so genannten Akkretionsscheibe aufstaut. Schließlich aktiviert es die energiereichen Jets.

Einmal entstanden, dringen diese aus der Galaxie heraus in das Haufengas ein, wo ihre Energie in Wärme umgewandelt wird. Das bremst die Kühlströmungen oder schaltet sie sogar ab. Demzufolge beißen die Schwarzen Löcher gewissermaßen die Hand, die sie füttert. Denn mit dem Ende der Kühlströmung versiegt der Zustrom in das Schwarze Loch und dessen Aktivität endet. Dadurch schwächen sich die Jets ab und die Wärmezufuhr im Haufengas bricht zusammen. Ist das Gas in der Zentralregion nach einigen Millionen Jahren abgekühlt, beginnt es erneut in die Galaxie einzuströmen – ein neuer Wachstumszyklus der zentralen Galaxie und ihres Schwarzen Lochs setzt ein.

Dass sich diese Aktivitätszyklen wiederholen, legen hoch aufgelöste Röntgenbeobachtungen des Virgo-, Perseus- und Hydra-Haufens nahe. Jets, magnetisierte Gasringe, Blasen sowie *Plumes*, die an Rauchfahnen erinnern, mit Größen

Kosmische Schallwellen – Echo gewaltiger Ausbrüche





BEIDE OBEN UND UNTEN LINKS: NASA / CXC / IOA, ANDREW FABIAN ET AL.; UNTEN RECHTS: NASA / CXC / HARVARD CFA, WILLIAM FORMAN ET AL.

Im sichtbaren Spektralbereich wirkt NGC 1275, die zentrale Riesengalaxie des Perseus-Haufens, unspektakulär (links außen). Erst die Röntgenaufnahme (links) verrät die dramatischen Prozesse in ihrer Nähe. Am Rand der Galaxie existieren zwei Blasen, die auf diesen Bildern leer scheinen, tatsächlich aber mit energiereichen Teilchen gefüllt sind. Bei verstärktem Kontrast sind wellenförmige Strukturen erkennbar (links außen unten) – vermutlich Schallwellen, die Energie in das intergalaktische Gas transportieren.

Aus Messier 87, der zentralen Galaxie des Virgo-Haufens, strömen zwar nur schwache Jets, dafür sind hier faszinierende Details erkennbar: Bögen (wahrscheinlich Stoßwellen), schwache Ringe (vermutlich Schallwellen) sowie gekrümmte *Plumes* – offenbar Spuren früherer Ausbrüche (links unten).

Die energiereichste Eruption, die Astronomen jemals beobachten konnten, findet seit 100 Millionen Jahren im Haufen MS 0735 statt (rechts). In dieser Abbildung ist die Röntgenstrahlung blau, die Radiostrahlung rot und das sichtbare Licht gelblich kodiert. Die Blasen (rot) enthalten 250-mal mehr Energie als diejenigen im Perseus-Haufen.

zwischen einigen tausend und einigen hunderttausend Lichtjahren gelten als Spuren heftiger Aktivität aus den letzten hundert Millionen Jahren.

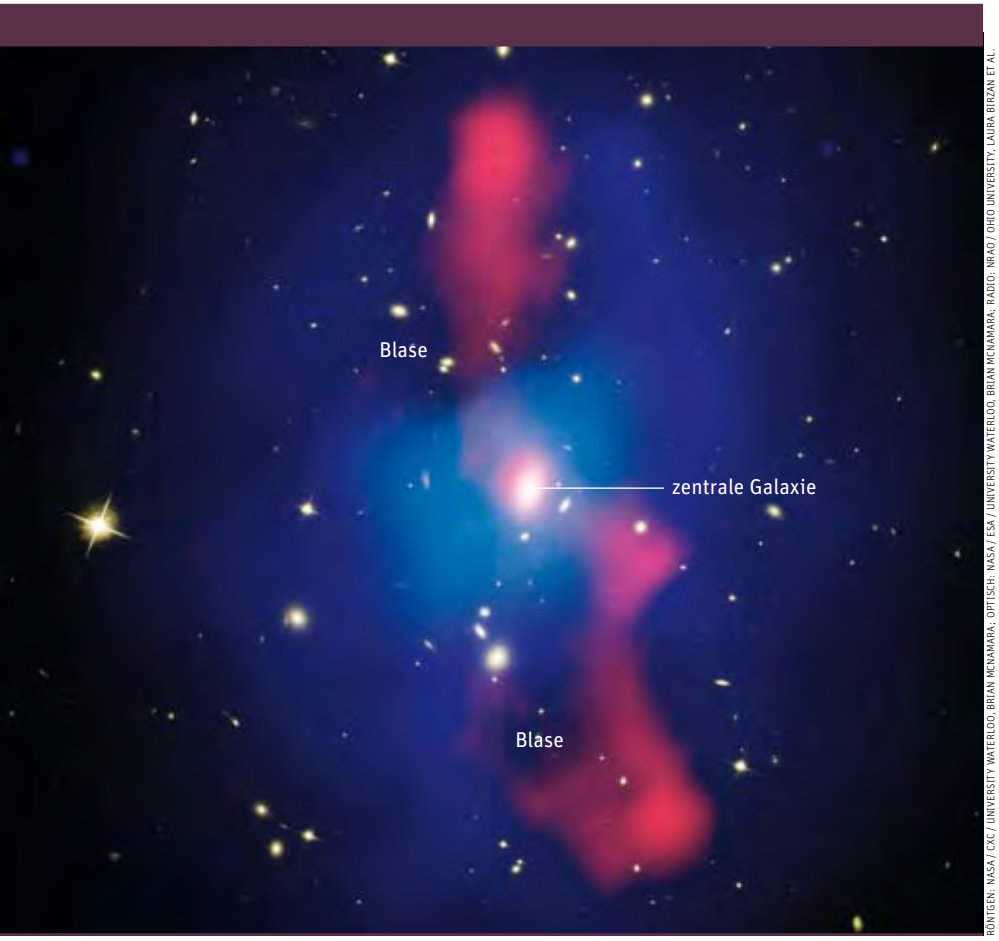
Einige massereiche Schwarze Löcher wachsen demzufolge auch noch heute rasant an. Bis vor Kurzem dachten die meisten Astronomen, das Wachstum der Schwarzen Löcher habe in den vergangenen sieben Milliarden Jahren deutlich nachgelassen. Die Röntgenlöcher des Haufens MS 0735 verraten jedoch, dass das Schwarze Loch in der zentralen Galaxie in den vergangenen 100 Millionen Jahren etwa die 300-millionenfache Masse der Sonne verschlungen haben muss. In dieser – astronomisch betrachtet – relativ kurzen Zeit hat sich seine Masse verdoppelt. Andere Zeichen für seine Aktivität gibt es nicht: Weder im Röntgenbereich noch im sichtbaren Spektralbereich leuchtet es hell, was typische Merkmale eines aktiven Schwarzen Lochs sind.

Komplizierter wird dieses Szenario durch Zusammenstöße zwischen den Galaxien. In den dicht bevölkerten Haufenzentren geschieht das besonders häufig. Gelangt eine kleinere Welteninsel in die Nähe der zentralen Galaxie, wird sie von Gezeitenkräften buchstäblich auseinandergerissen. Ihre Sterne sinken in die Letztere, die Schwarzen Löcher beider Galaxien verschmelzen. Das Gas des Opfers fällt dort hinein und löst einen Aktivitätszyklus aus. Die enorm großen Röntgenlöcher in MS 0735 könnten so entstanden sein.

Dass Kollisionen in Haufen noch heute eine wichtige Rolle spielen, könnte den Wissenschaftlern dabei helfen, besser zu verstehen, wie sich Welteninseln im frühen Universum entwickelten. Die Haufen sind gewissermaßen lebende Fossilien. Auf Grund der sinkenden Dichte des expandierenden Alls sind galaktische Kollisionen und Verschmelzungen in den vergangenen acht Milliarden Jahren selten geworden (siehe SdW 4/2007, S. 32). Nur in den dicht gedrängten Haufen kommt es noch heute oft dazu. Vieles spricht dafür, dass Aktivitätszyklen, die von Kollisionen angestoßen werden, auch das Wachstum und die Sternentstehung normaler Galaxien regeln (siehe SdW 9/2003, S. 38). Stoßen gasreiche Welteninseln zusammen, entstehen dort schlagartig zahlreiche Sterne. Gleichzeitig wird das Schwarze Loch in der Mitte gefüttert. Es sendet energiereiche Strahlung aus, treibt durch Strahlung und Jets Gas aus der Galaxie und erhitzt es, sodass die Sternentstehung nachlässt – bis zur nächsten Kollision der Welteninseln.

Verblüffend ist immer wieder, dass die zentralen Schwarzen Löcher so einflussreich sind, obwohl sie nur einen Bruchteil der Galaxienmassen enthalten – Millionen oder hundert Millionen Sonnenmassen verglichen mit Milliarden bis hundert Milliarden –, von den Massen der Galaxienhaufen (bis zu hundert Billionen Sonnenmassen) ganz zu schweigen.

Ihr Einfluss beruht auf der enormen Konzentration von Masse und den damit verbundenen, extremen Gravitationsfeldern. Massereiche Schwarze Löcher sind bei Weitem die größten Vorräte an potenzieller Energie in den Galaxien. Akkretionsscheiben und Jets nutzen dieses Reservoir und prägen auf einzigartige Weise die Entwicklung kosmischer Strukturen. ◁



RÖNTGEN: NASA / CXC / UNIVERSITY WATERLOO, BRIAN MCNAMARA; OPTISCH: NASA / ESA / UNIVERSITY WATERLOO, BRIAN MCNAMARA; RADIO: NRAO / OHIO UNIVERSITY, LAURA BIRZAN ET AL.

Wallace Tucker, Harvey Tananbaum und **Andrew C. Fabian** haben in den letzten drei Jahrzehnten die Röntgenastronomie entscheidend mitgeprägt. Tucker (ohne Bild) ist Sprecher des Chandra-Röntgenzentrums am Smithsonian Astrophysical Observatory in Cambridge (Massachusetts), dessen Direktor Tananbaum (Bild oben) ist. Fabian (unten) ist Professor am Institut für Astronomie der Universität Cambridge (Großbritannien).

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Energy input from quasars regulates the growth and activity of black holes and their host galaxies. Von T. Di Matteo, V. Springel und L. Hernquist in: Nature, Bd. 433, S. 604, 2005

A deep Chandra observation of the Perseus cluster: shocks and ripples. Von Andrew C. Fabian et al. in: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Bd. 344, S. L43, 2003

Cooling flows in clusters of galaxies. Von Andrew C. Fabian in: Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Bd. 32, S. 277, 1994

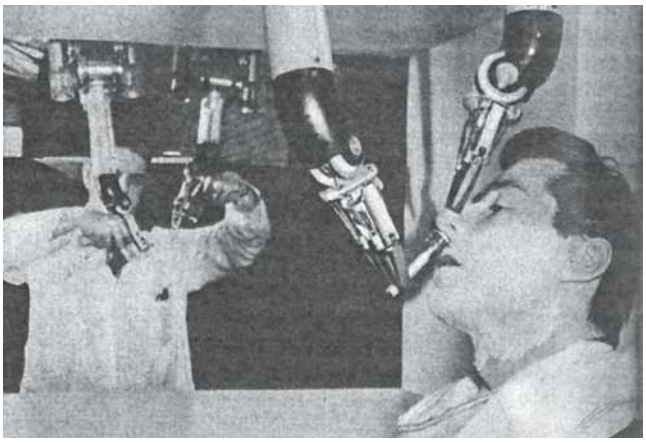
Electromagnetic extraction of energy from a Kerr black hole. Von R. D. Blandford und R. L. Znajek in: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Bd. 179, S. 433, 1977

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/864362.

WISSENSCHAFT IM RÜCKBLICK

Atomfriseur

»›Atomfriseur‹ nennt man im britischen Atomzentrum Harwell einen Wissenschaftler, der an einem drastischen Beispiel die geradezu unfaßbare Feinfühligkeit der ›ferngesteuerten‹ Geisterhände vorführte. Mit den für den Umgang mit radioaktiven Stoffen konstruierten Greifern vollführte er an einem ›Versuchskaninchen‹ eine einmalige ›Fernrasur‹. Er wollte damit beweisen, welche Präzisionsarbeit mit den mechanischen Atomhänden möglich ist.« *Hobby, 5. Jg., Nr. 5, S. 64, Mai 1957*



Auch Wissenschaftler können Bärte trimmen.

Neuer Kunststoff Polypropylen

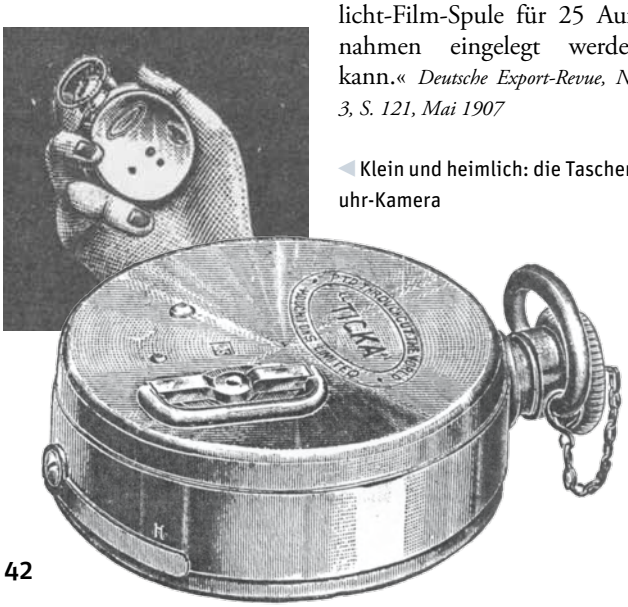
»Nach dem außerordentlichen Erfolg, den der Kunststoff Polyäthylen in den letzten Jahren hatte, besitzt neuerdings auch das Polypropylen in den USA ein besonderes Interesse. Chemisch sind beide Stoffe sehr nahe verwandt, das Polypropylen zeichnet sich jedoch gegenüber dem Polyäthylen durch eine größere Hitzebeständigkeit aus. Weitere günstige Eigenschaften sind: Unempfindlichkeit gegen Sauerstoff und Luft, Schmelzpunkt 160 °C, kein wachsartiger Griff, Beständigkeit gegenüber Lösungsmitteln. Die aus Polypropylen hergestellten Fasern sollen in der Festigkeit mit Nylon vergleichbar sein.« *Umschau, 57. Jg., Heft 10, S. 311, Mai 1957*

Schluckimpfung gegen Polio

»Professor Sabin von der Universität Cincinnati prüfte an 130 Personen ein neues Verfahren zur Immunisierung des Menschen gegen spinale Kinderlähmung. Dabei benutzte er Erreger der Poliomyelitis, deren Virulenz wesentlich geschwächt ist. Neuartig bei diesen Versuchen ist vor allem, daß Prof. Sabin das Präparat den Freiwilligen über den Verdauungstrakt verabreichte. Der Salksche Impfstoff enthält dieselben Erreger, jedoch in abgetöteter Form. Aus den Versuchen folgert der Forscher, daß sich durch eine orale Dosis etwa der gleiche Immunisierungseffekt erreichen läßt wie durch zwei Injektionen des Salkschen Impfstoffs.« *Orion, 12. Jg., Nr. 5, S. 414, Mai 1957*

Geheimfotos mit Taschenuhr

»Von jeher hat man danach gestrebt, bei der Aufnahme tunlichst keine fremde Aufmerksamkeit zu erregen und die Aufnahmen unter Umständen auszuführen, ohne dass die aufzunehmenden Personen selbst es bemerken. Das Nonplusultra in dieser Beziehung ist die neue kleine Taschenuhr-Kamera. Der Apparat lässt sich in denkbar bequemster Weise in der Tasche tragen. Das Originelle der Konstrucktion ist, dass dort, wo bei den Uhren der Aufzugsknopf angebracht ist, also unter dem Ring, sich das Objektiv befindet und dass im Innern der Uhr eine Tageslicht-Film-Spule für 25 Aufnahmen eingelegt werden kann.« *Deutsche Export-Revue, Nr. 3, S. 121, Mai 1907*



Klein und heimlich: die Taschenuhr-Kamera

Waren Menschen jemals Riesen?

»In einer fesselnden Studie über die menschliche Statur in verschiedenen Zeitaltern bekämpft A. Dastre die weitverbreitete Meinung, daß die heutigen Rassen die entarteten Nachkommen einer einstigen größeren und kräftigeren Rasse seien … Wie hätten Stämme von so gewaltiger Konstitution jemals gänzlich verschwinden können? fragt Dastre. Die vorgenommenen Messungen von Menschen aller Zeiten haben keine Anhaltspunkte für die Annahme ergeben, daß die menschliche Natur kleiner geworden ist.« *Himmel und Erde, 19. Jg., S. 237, Mai 1907*

Zuverlässigkeit von Wetterprognosen

»Professor Klein sucht nachzuweisen, daß die staatlichen Wetterprognosen nur unbedeutend über der naiven Prognose: ›Wetter morgen wie heute‹ stehen. Demgegenüber ist ein Mitarbeiter der Zeitschrift Himmel und Erde bestrebt, jene Prognose in Schutz zu nehmen. Er behauptet, daß Klein nur wegen ›einer zu rigorosen Auffassung bezüglich des Nichteintreffens der Prognosen‹ zu so ungünstigen Resultaten gelangen konnte. Er selbst stellt eine andere Berechnung auf … Wenn eine Differenz zwischen der Prognose und der Wirklichkeit drei Grad bei der Temperatur beträgt, wird das noch als ein Treffer angesehen.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 107, S. 264, Mai 1907*

Schrott-DNA – Mitspieler der Evolution

Springende genetische Elemente, lange als nutzlos eingestuft, entpuppen sich als wichtige Triebkraft der Evolution. Durch ihr Zusammenspiel mit Genom und Umwelt haben sie darauf Einfluss, wie Gene in physische Merkmale übersetzt werden.

Das englische Original dieses Artikels erschien unter dem Titel »Junk DNA as an evolutionary force« in »Nature«, Bd. 443, S. 521, 2006. Die Indexzahlen verweisen auf die Referenzen in der Literaturliste, zu finden unter www.spektrum.de/artikel/869370.

Von Christian Biémont und Cristina Vieira

Transponierbare Elemente (TEs, *transposable elements*) oder umgangssprachlich nicht völlig korrekt »springende Gene« *(jumping genes)*: So bezeichnen Genetiker DNA-Abschnitte, die innerhalb des Genoms einer Zelle den Ort wechseln können. Das Erbgut vieler höherer Organismen ist mit Kopien jener rätselhaften beweglichen Elemente geradezu vollgestopft. Barbara McClintock entdeckte sie schon um 1950 (siehe Kasten S. 46). Doch erst jetzt, ein halbes Jahrhundert später, beginnen Forscher Verhalten und Wirkungen von transponierbaren Elementen zu verstehen. Offensichtlich haben die TEs die Evolution von Genomen wesentlich beeinflusst, insbesondere durch eine Kontrolle über Genaktivitäten.

Transponierbare Elemente enthalten alle notwendigen Informationen, um sich aus ihrer Wirts-DNA herauszuschneiden und an anderer Stelle wieder einzufügen (siehe Kasten S. 47). Nicht immer ist das harmlos: Solcher »DNA-Schrott« *(junk DNA)* kann in Gene oder deren regulierende Elemente gelangen und sie damit unter Umständen untauglich machen. Er kann sogar einen Umbau von Chromosomen in Gang setzen. Die meisten solchen Kopien sind zwar für sich genommen selektionsneutral und damit zunächst unschädlich. Trotzdem gelten sie seit Langem als gefährlich, können sie doch zu Mutationen beitragen, von denen manche eventuell Krankheiten auslösen.

Doch nicht immer bringen transponierbare Elemente Nachteile. Sie tragen mit ihrer Mutationstätigkeit auch zur genetischen Vielfalt von Organismen bei. Manche TEs wurden sogar vom Wirtsgenom gebändigt – domestiziert. Jetzt stehen sie als Gen oder als genregulierendes Element in deren Dienst und sind dann auch Quell für Neuerungen.[1,2] Die Steuerung der TEs besser zu verstehen, wird begreifen helfen, wie sich die Umwelt bei einer bestimmten genetischen Ausstattung auf die Genaktivitäten auswirkt – das heißt, wie ein individueller Phänotyp erwächst, mit seinem körperlichen Erscheinungsbild, seinen Verhaltensmerkmalen, seiner Krankheitsanfälligkeit, bis hin zu Unterschieden auf neuronaler Ebene.

Springende genetische Elemente kommen bei vielen Pflanzen und Tieren vor. Sie liegen in deren Genomen weit verstreut und können jeweils einen beträchtlichen Anteil der Erbmasse ausmachen (siehe Tabelle S. 46). Zwei Hauptklassen von TEs werden unterschieden (siehe auch Kasten S. 47):

- »DNA-Transposonen« (oder Transposons) gehen über eine Zwischenform aus reiner DNA und verwenden die Replikationsmaschinerie der Wirtszelle zu ihrer

In Kürze

- Ein beträchtlicher Anteil der Genome höherer Organismen besteht aus springenden – transponierbaren – Elementen, gern verkürzt als **springende Gene** bezeichnet.
- Diese beweglichen Elemente **(TEs)** können Gene verändern und Genaktivitäten regulieren. Sie erzeugen nicht nur auf Gen-, sondern auch auf Genomebene **Mutationen**. Sie übermitteln dem Erbmaterial Umweltbedingungen und können Krankheiten hervorrufen. Vor allem treiben sie die **Evolution von Genomen**, sprich von Populationen und Arten voran.
- Wichtige **Fachausdrücke** sind im Kasten S. 47 aufgeführt.

IMAGES.DE / IPN, CHUCK PEFLEY

Bunte Maiskolben und Farbvarianten der Körner entstehen durch »springende Gene« – genauer gesagt durch »transponierbare genetische Elemente«.

Vervielfältigung (»Replikation« oder »Reduplikation«: Verdopplung der DNA).

► »Retrotransposonen« gehen über eine Zwischenform aus RNA (der Umschrift von DNA, an der Proteine entstehen). Hiervon unterscheiden Forscher: LTR-Retrotransposonen – mit langen Wiederholungen *(long terminal repeats)* an beiden Enden; und Nicht-LTR-Retrotransposonen.

Zudem entdecken die Genetiker fortwährend auch komplexer zusammengesetzte TEs, ein Zeichen ihrer immensen Wandlungsfähigkeit. Zum Beispiel stellte sich kürzlich heraus, dass beim Mais »Helitronen«, erst vor wenigen Jahren entdeckte besondere Transposonen, verschiedenste Genabschnitte in neue Stellen im Genom kopieren. Sie schaffen so in einzelnen Maispflanzen eine riesige Vielfalt.[3] (Helitronen folgen bei der Replikation dem Prinzip »rollender Ring«, *rolling-circle*, ein zuvor bei ringförmiger DNA von Viren bekannter Mechanismus des Ablesens.)

Schneiden sich LTR-Retrotransposonen aus dem Genom heraus, so hinterlassen sie gern eine LTR-Sequenz. Vor allem manche Pflanzengenome sind mit solchen Überbleibseln durchsetzt. Da derartige TE-Reste auf die Genregulierung Einfluss nehmen können, vermögen sie auch allein zur genetischen Vielfalt beizutragen.

Freilich hinterlässt nicht jedes springende Element einen so ausgeprägten Abdruck. Daher haben Forscher die Bedeutung der TEs lange unterschätzt. Inzwischen spürten sie aber weniger auffällige Reste auf. Das hilft, den Einfluss von TEs auf Mutationen und die Evolution zu erhellen. Bei Säugetieren beispielsweise entdeckten Fachleute kürzlich eine alte Familie von Sequenzen, die von »Sines« abstammen (kurzen wiederholten, verteilten Elementen, *small interspersed nuclear elements*; siehe Kasten S. 47).[4] Diese TE-Überbleibsel kodieren nicht für Proteine, stehen aber wohl dennoch unter starkem Selektionsdruck. Vielleicht erfüllen sie noch heute irgendeine alte Funktion.

Welcher Anteil der DNA-Mutationen bei Organismen auf eingefügte springende Elemente zurückgeht, scheint verschieden zu sein, wenn man die bisherigen Schätzungen vergleicht. Bei Taufliegen schwankt er zwischen einzelnen Tieren von 50 bis 80 Prozent – insgesamt ist das außerordentlich viel, verglichen mit 0,1 bis 1 Prozent der Mutationen beim Menschen. Im Humangenom sind die zahlreichen Kopien der Nicht-LTR-Retrotransposonen weniger aktiv und meist in ihrer Position fixiert. Der Grund für den großen Unterschied zwischen diesen beiden Arten ist nicht recht klar. Vielleicht hängt es mit genomtypischen generellen Merkmalen zusammen, zum Beispiel der Rate, mit der sich Gene von Generation zu Generation neu mischen – rekombinieren.

Aktive springende Elemente

Wie stark sich an einem transponierbaren Element RNA-Kopien bilden – wie aktiv es exprimiert wird –, hängt vom Gewebetyp ab. Manche TEs werden in bestimmten Lebensphasen des Organismus intensiv abgelesen. Bei einigen unterscheidet sich sogar die Expression in den männlichen und weiblichen Keimzellen und in der so genannten Keimbahn. Es überrascht, dass scheinbar nutzlose Schrott-Sequenzen mit hoher Rate und zudem nach Regeln exprimiert werden.

Die Forscher erklärten das paradoxe Phänomen zunächst entweder mit komplexen Wechselwirkungen zwischen den Regulatorsequenzen von TEs und der Aktivität von Entwicklungsgenen oder sie postulierten, dass die TEs versehentlich zusammen mit besonders stark exprimierten Genen in ihrer Nachbarschaft abgelesen werden (das *readthrough*-Phänomen). Die Energieverschwendung war allerdings schwer zu begründen. So gewann die Vor- ▷

▷ stellung Anhänger, die viele RNA von Transposonen würde sozusagen absichtlich für bestimmte Zwecke hergestellt.

Diese Hypothese bekam kürzlich Auftrieb, als Forscher bei Eizellen und sehr frühen Embryonen von Mäusen registrierten, dass einige Retrotransposonen tatsächlich Einfluss auf die Regulierung bestimmter Gene und auf Entwicklungsprozesse nehmen.[5] Die Befunde McClintocks bestätigten nicht nur die Ansicht, TEs fungierten als Kontrollelemente (siehe Kasten unten); die Ergebnisse schienen außerdem anzuzeigen, dass springende Sequenzen vielleicht auch beim Umbau der Genomstruktur eine Rolle spielen, und dass sie ebenso dabei mitwirken, wenn früh in der Embryonalentwicklung ein Teil der Gene stillgelegt wird (die so genannte genomische Methylierung oder genetische Prägung).

Somit könnten transponierbare Elemente einen merklichen Einfluss darauf nehmen, inwieweit in der frühen Entwicklung jeweils Erbsequenzen von der Mutter oder vom Vater aktiv sind. Denn viele Tiere besitzen Gene, deren Expression sich nach der elterlichen Herkunft richtet. Einige TEs von Säugetieren verhalten sich, abhängig von ihrem Typ, ähnlich wie »geprägte« Gene. Beispielsweise sind die Sines in den Eizellen methyliert – und somit inaktiviert –, nicht aber in der männlichen Keimbahn. Mit bestimmten anderen Elementen verhält es sich umgekehrt (etwa einer Fraktion der Lines: dem Element Line-1).[6] Geschlechtsspezifischen Mustern folgen offenbar auch Iaps (intrazisternische A-Partikel; mehr dazu siehe weiter unten). Auch darin gleichen solche Sequenzen geprägten Genen: Stillgelegte Gene väterlicher Herkunft liegen im menschlichen Genom meist in anderen Regionen als stillgelegte mütterliche Gene. Anders gesagt: Einzelne Regionen auf den Chromosomen werden in männlichen oder weiblichen Keimzellen unterschiedlich aktiviert.

Die Stummschaltung und Aktivierung von TEs in der Keimbahn[7] kann Gene betreffen, die an der so genannten RNA-Interferenz (RNAi) beteiligt sind. Hierbei veranlasst doppelsträngige RNA den Abbau bestimmter Boten-RNA (Matritzen für Proteine) und unterbricht somit die Herstellung des kodierten Proteins. Forscher vermuten, dass die RNAi als Abwehr, quasi als eine Art Immunkraft – nur eben mittels Nukleinsäuren – gegen Viren und springende Elemente entstand.[8] (Sowohl DNA wie RNA sind Nukleinsäuren.)

Nicht nur in der Embryonalentwicklung, auch in späteren Lebensphasen mögen transponierbare Elemente eingreifen. Eine Fraktion der so genannten Lines (lange verstreute Kernelemente, *long interspersed nuclear elements*), die Line-1-Retrotransposonen, springen anscheinend bevorzugt in regulatorische Abschnitte von einigen Genen, die spezifisch in Nervenzellen aktiv sind. Das wurde bei Mäusen gefunden.[9] In betroffenen Zellen verändert sich dadurch die Expression jener Gene, wodurch sich unterschiedliche Nervenzellpopulationen herausbilden, ein so genanntes somatisches Mosaik.

Was eine solche TE-Aktivität für die Nervenzellfunktionen bedeutet, bleibt noch genauer zu erforschen. Sollte das Phänomen auch beim Menschen vorkommen, dann könnten Line-1-Elemente für individuelle Veränderungen von Neuronenschaltkreisen im Gehirn verantwortlich sein und somit auch die

Entdeckung der »springenden Gene«

Mobile genetische Elemente entdeckte die amerikanische Botanikerin und Genetikerin Barbara McClintock (1902–1992) in den 1940er Jahren bei Mais. Dafür erhielt sie 1983 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. McClintock beobachtete, dass sich die Farbmuster der Maiskörner bei verschiedensten Kreuzungen verändern. Daraus schloss sie auf eine Regulation der Genaktivität durch »Kontrollelemente«, die auf den Chromosomen zu anderen Stellen zu springen vermögen. Solche Ortswechsel finden statt, während sich die Zellen teilen und vermehren – weswegen sie nur in einigen der Zellen Gene verändern. Die Farbspiele der Maiskörner kommen zu Stande, wenn die springenden Elemente Gene für die Pigmentierung heimsuchen. Die wichtigste Folgerung der Forscherin: Solche Elemente haben für die Entwicklung von Organismen große Bedeutung.

Wie Genetiker in den 1970er Jahren entdeckten, beherbergen Bakterien, Hefe und Taufliegen DNA-Elemente, die sich aus dem Genom herausschneiden und an anderer Stelle wieder einfügen können. Daraufhin gelang es, transponierbare Elemente (TEs) definitiv zu identifizieren und nachzuweisen, dass sie wesentliche Bestandteile von Genomen sind. Oft verursachen TEs somatische Mutationen (die nicht erblich sind, weil sie die Keimzellen nicht betreffen). Doch auch Gene in der Keimbahn können hierdurch mutieren – dann entstehen erbliche Mutationen.

Noch mehr wuchs das Interesse an den springenden Elementen, als seit dem Jahr 2000 Rohfassungen der Sequenz des Humangenoms vorlagen. Sie besagten, dass die menschliche DNA zu etwa 45 Prozent aus TEs besteht. Trotzdem erkannten die Forscher längst nicht deren enorme Bedeutung für die Genregulierung. Erst jetzt begreifen sie, dass diese Elemente in den Genomen der meisten Organismen wichtige Mitspieler darstellen. Vollkommen anerkannt ist heute die These McClintocks, dass transponierbare Elemente die Aktivität von Genen kontrollieren können.

C.B. & C.V

Anteil transponierbarer Elemente in verschiedenen Genomen

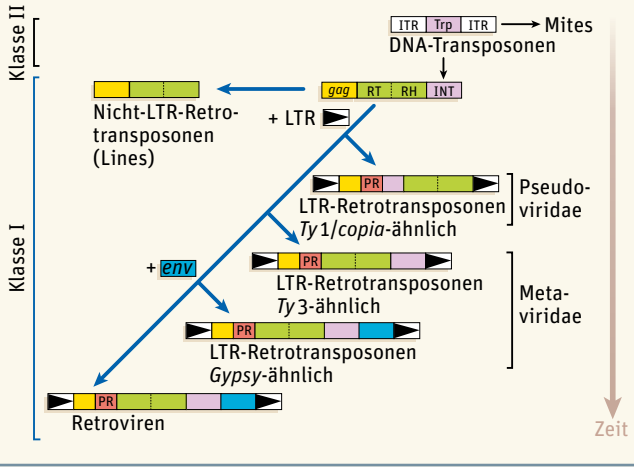
		Genomgröße in Pikogramm	Prozent TEs
Rana esculenta	Wasserfrosch	5,6–8,0	77
Zea mays	Mais	5,0	60
Homo sapiens	Mensch	3,5	45
Mus musculus	Labormaus	3,4	40
Drosophila melanogaster	Taufliege	0,18	15–22
Caenorhabditis elegans	kleiner Fadenwurm	0,1	12
Saccharomyces cerevisiae	Bäckerhefe	0,012	3–5
Escherichia coli	Bakterium	0,0046	0,3

Namensystem transponierbarer Elemente

Für transponierbare Elemente (TEs) gibt es bisher keine offizielle Klassifizierung. Die hier vorgestellte Einteilung basiert auf ihrer Evolution (ihrer Phylogenie) und den jeweils vorhandenen genetischen Modulen (verändert nach [30]). Oft werden transponierbare Elemente allgemein **Transposonen** (oder **Transposons**) genannt. Ursprünglich hieß so nur das erste charakterisierte TE. Dieses Element bewegt sich im Genom mittels einer DNA-Zwischenform. Zum Aus- und Einbau in den Erbstrang nutzt es das Enzym Transposase (Trp).

Solche Elemente heißen auch **DNA-Transposonen** oder **Klasse-II-Elemente**. Davon unterschieden werden die **Retrotransposonen** oder **Klasse-I-Elemente**, mit zwei Sorten: die **LTR-** und **Nicht-LTR-Retrotransposonen** (LTR: *long terminal repeats*, lange Sequenzwiederholungen am Ende). Sie gehen über eine RNA-Zwischenform. Für die Rückführung ins Genom benutzen sie das Enzym Reverse Transkriptase (RT), das auch dafür sorgt, dass an der neuen Stelle ein DNA-Doppelstrang aufgebaut wird.

DNA-Transposonen benötigen zu ihrer Mobilität ITRs (*inverted terminal repeats*, umgekehrte Wiederholungen am Ende). Retrotransposonen brauchen das *gag*-Gen, damit sie in eine RNA-Sequenz umgeschrieben werden. Das Enzym Ribonuklease H (RH) baut die DNA-RNA-Hybriden ab, die bei der Transposition entstehen. Das Enzym Integrase (INT) führt die neu hergestellte doppelsträngige DNA an einer neuen Stelle ins Genom ein. Eine Protease (PR) hilft, Vorläuferproteine zurechtzuschneiden und die Proteine herzustellen. Manche Retrotransposonen enthalten zudem ein Gen *env* (*envelope*, Hülle). Es kodiert für ein Oberflächenprotein, das sich an Zellmembranen binden kann und das Element damit infektiös macht.



Das menschliche Genom enthält etwa eine halbe Million Kopien von **Lines** (*long interspersed nuclear elements*, lange verstreute Elemente im Zellkern). Von denen sind 50 bis 100 noch aktiv. ***Alu*-Elemente** sind sogar mit über einer Million Kopien vertreten. Sie gehören zur Klasse der **Sines** (*short interspersed nuclear elements*, kurze verstreute Elemente). Zur Transposition benötigen sie Lines. Auch bei Hunden bilden sie eine wichtige Quelle für genomische Vielfalt.

Eine alte TE-Familie bilden die **Mites** *(miniature inverted-repeat transposable elements)*. Sie stammen vermutlich von DNA-Transposonen ab, kommen überall vor und haben kein Kodierpotenzial.

Manche Forscher möchten die springenden Elemente anders sortieren, etwa nach den Mechanismen der Transposition. Einige adaptieren für LTR-Retrotransposonen eine Klassifizierung für Viren und sprechen von Metaviridae und Pseudoviridaee.[30] Allgemein anerkannt sind diese Vorschläge nicht. **C.B. & C.V**

Bandbreite menschlicher Intelligenz mitbestimmen. Hier öffnet sich ein weites neues Forschungsfeld – über Vorgänge, die früher selbst jenen TE-Experten nie in den Sinn gekommen wäre, die den springenden Elementen längst zutrauten, die genetische und phänotypische Vielfalt voranzutreiben.

Wie die Umwelt Gene beeinflusst

Bei vielen Organismen werden TEs auch »epigenetisch« kontrolliert. Bei dieser Form der genetischen Regulation verändert sich die betreffende DNA-Sequenz selbst nicht. Dennoch wird diese DNA, sozusagen von außen her, modifiziert – nämlich markiert – und damit ihre mögliche Aktivität manipuliert. Oder auch die mit dem betreffenden DNA-Abschnitt assoziierten Proteine werden verändert – also hauptsächlich die Histone, die sich um die DNA winden. Bestimmte Nukleotide (DNA-Bausteine) erhalten Methylgruppen. Histone können methyliert oder acetyliert (mit Acetylgruppen versetzt) werden. Solche epigenetischen Markierungen wirken sich direkt auf den Expressionsgrad benachbarter Gene – und TEs – aus. Neben dem bekannten DNA-Kode gelten sie als zweiter Kode.[10]

Einige epigenetische Anweisungen im Genom bestehen gewöhnlich lange und sind sogar erblich. Dazu gehört die so genannte Prägung von Genen. Jedoch reagiert der epigenetische Kode auf äußere Einflüsse sensibler als die DNA-Sequenz.[11] Selbst bei eineiigen Zwillingen entwickeln sich epigenetische Modifikationen im Lauf des Lebens allmählich auseinander.[12] Stress von außen verändert die genomische Methylierung und somit die Struktur des Chromatins – der DNA mit ihren assoziierten Proteinen. Er wirkt sich somit auf die Genexpression aus. Darum können äußere Faktoren erheblich beeinflussen, wie erbliche Veränderungen der DNA-Sequenz (des Genotyps) in physische Merkmale (Phänotypen) umgesetzt werden. Unterschiedlich gearteter Stress zeigt auch jeweils andere Effekte auf die DNA-Methylierung, die Histon-Methylierung und -Acetylierung, auf die Chromatinstruktur und die Synthese kleiner RNA-Moleküle. Diese verschiedenen Prozesse spielen in ihrer Wirkung auf die genomische Funktion zusammen. Sie bilden den Kern des so genannten epigenetischen Gedächtnisses.[13]

Auch springende Elemente können Außeneinflüsse vermitteln helfen. Sie können nämlich Gene epigenetisch kontrollieren, wenn sie sehr nahe bei ihnen oder inmitten der Gene liegen.[14] Entweder leiten die TEs eine Methylierung der benachbarten DNA direkt ein – und legen somit den DNA-Bereich still. Oder sie agieren indirekt, indem sie den normalen epigenetischen Status eines Gens ihrer Nachbarschaft stören.

Ein klassisches Beispiel für eine solche Wechselwirkung zwischen TE und Gen ist die Kontrolle über das *agouti*-Gen von Mäusen, was sich in der Farbe des ansonsten braunen Fells nieder- ▷

▷ schlägt. Wird dieses Gen überexprimiert, bekommen die Nager ein helles, gelbliches Fell. Sie sind zudem fett, diabetisch und entwickeln leichter Tumoren. Setzt sich ein so genanntes Iap-Retrotransposon (intrazisternischer A-Partikel) direkt vor das *agouti*-Gen, so hängt dessen Expression von dem Methylierungsstatus des Iap ab. Sind die Zellen einzelner Körperpartien unterschiedlich methyliert, bekommen die Tiere ein fleckiges braunes und gelbes Fell. In der männlichen Keimbahn wird die Methylierung des Iap-Retrotransposons vollständig gelöscht, in der weiblichen Keimbahn aber nur unvollständig. Deswegen vererbt sich die variable Expression des *agouti*-Gens epigenetisch auf spätere Generationen, als würde ein auf die Mutter wirkender Umwelteinfluss weitergegeben.[15]

Dass Umweltfaktoren beeinflussen, wie aus einem Genotyp ein Phänotyp entsteht – diese These bestärkt auch folgender Befund: Die Ernährung in früher Jugend kann sich auf die Expression aller möglichen Gene und TEs in kritischen Entwicklungsstadien auswirken.[16] Viele vermuten, wenn jemand zu dick oder zu dünn ist, beruhe das auf Fehlregulationen auf physiologischer Ebene. Doch nun sieht es so aus, als könnten auch Genaktivitäten durch TEs verändert sein. Wir sollten uns folglich mehr dessen bewusst werden, wie stark sich Umwelteinflüsse, die wir in einem Lebensabschnitt erfahren, in anderen Phasen durchprägen können. Das gilt auch noch für das Erwachsenenalter. Besonders wäre der Zusammenhang nicht zu unterschätzen, falls eine neue Umgebung tatsächlich bestimmte Nervenfunktionen zu modifizieren vermag, weil sich nun die Expression von springenden genetischen Elementen ändert.

Forscher sehen solche Phänomene zunehmend als potenziell verantwortlich für eine Reihe von Krankheiten, insbesondere von Krebs [17,18] – seit sie entdeckten, dass springende Elemente Mutationen und den Umbau von Chromosomen fördern können und dass sie zudem durch Veränderung ihres epigenetischen Status aktivierbar sind. Nach heutiger Vorstellung könnten durch TEs erzeugte Fehlfunktionen oder Fehlregulierungen von Genen ungefähr 0,5 bis 1 Prozent der menschlichen Erkrankungen verursachen.[19] Die Bluterkrankheit, die Duchenne-Muskeldystrophie, auch Tumoren der Speiseröhre und der Fortpflanzungsorgane sowie Brustkrebs mögen damit zusammenhängen, dass Sines oder Lines in oder nahe bei bestimmten Genen sitzen.

Das menschliche Genom ist mit Tausenden von Kopien so genannter humaner endogener Retroviren (Hervs) durchsetzt. Diese Viren sind mit Retrotransposonen verwandt und gleichfalls dauerhaft in unser Genom integriert. Viele ihrer Kopien wirken offenbar bei Teratokarzinomen oder Leukämie mit, andere bei multipler Sklerose, Schizophrenie oder Diabetes. Jedoch sind Herv-Einschübe nicht grundsätzlich schädlich. Manche benutzt das Genom sogar für zelluläre Aufgaben. Das Gen für Syncytin etwa – ein bei Mensch und Maus für die Ausbildung der Plazenta benötigtes Protein – stammt von einem endogenen Retrovirus ab.[20]

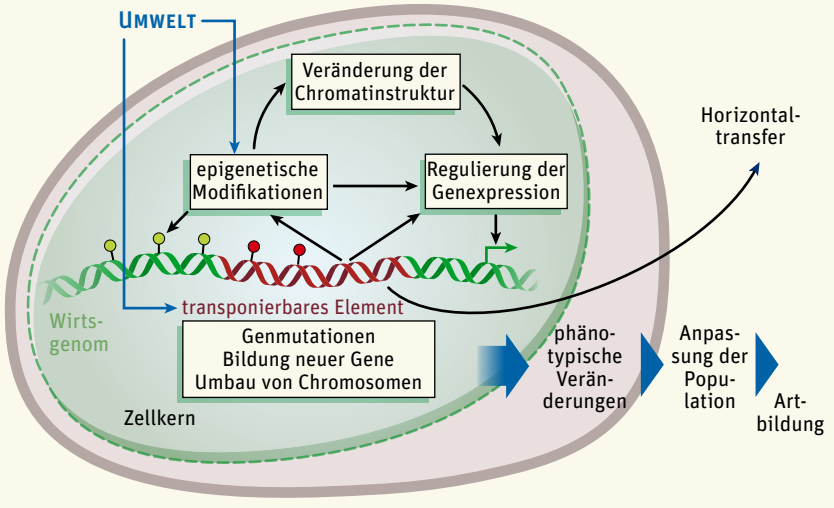
Da Umwelteinflüsse die Methylierung von TEs verändern können, erscheint es möglich, dass Nahrungsmittel oder Chemikalien über DNA-methylierende Enzyme auf normale physiologische Vorgänge Einfluss nehmen und so Krankheiten – etwa Krebs – hervorbringen. Diese Zusammenhänge verstehen die Forscher noch kaum. Was Gentherapien betrifft, sollte man mit dem Einsatz von modifizierten Retrotransposonen und Retroviren vorsichtig sein. In Einzelfällen aktivierte das übertragene Retrovirus ein Krebs förderndes Gen.[21]

Die Rate, mit der sich transponierbare Elemente im Genom bewegen können, ist vergleichsweise hoch. Je nach TE beträgt sie zwischen 10^{-3} und 10^{-5} Transpositionen pro Generation. TEs stellen

Wechselspiel zwischen Genom und Umwelt

Genetiker erkennen immer mehr, dass transponierbare Elemente (TEs) eine Hauptquelle für genetischen Wandel darstellen. Populationen können sich dank ihrer an veränderte Bedingungen anpassen, Arten sich entwickeln (siehe Bild). TEs vermögen auch auf andere Arten überzuspringen. Solcher Horizontaltransfer erlaubt ihnen, den vielfältigen Zwängen auszuweichen, mit denen ein Wirtsgenom sie schließlich kontrolliert. Im neuen Wirt vermehren sie sich, bis auch dort Mechanismen aufkommen, die ihre Vervielfältigung und Expression regulieren.

Doch außerdem werden sie etwas von Kontrollkräften eingedämmt, die auf Populationsebene arbeiten. Offenbar wirkt eine Selektion gegen direkt schädliche Effekte – selbst wenn diese klein sind – durch irgendwo eingebaute springende Elemente. Selektionskräfte scheinen sich auch gegen den Umbau von Chromosomen zu stemmen. Der erfolgt recht häufig, wenn TEs aus derselben Familie vorhanden sind. Wie sich die Selektion auswirkt, hängt vom jeweiligen TE ab sowie von der Struktur und dem Fortpflanzungssystem der Population. Daraus resultiert eine schwache Tendenz, TE-Kopien zu beseitigen oder sie im Genom anzuhäufen. Zeit wird so zu einer wichtigen Größe dafür, ob und inwieweit Genome durch TEs verändert werden. Im Ergebnis enthalten Genome ein Gemisch an springenden Elementen – noch aktiven wie stummen, längst degenerierten. C.B. & C.V



NATURE BD. 443, 05. OKT. 2006

somit für die Evolution weit mehr Rohmaterial bereit, als beim klassischen Austausch von Nukleotiden der DNA aufkommt. Mutationen an einzelnen DNA-Bausteinen ereignen sich pro Nukleotid und Generation 10^{-8}- bis 10^{-9}-mal. Wenn neue Arten auftraten, mögen dabei Wellen der Mobilisierung und des Verlusts von TEs einen großen Beitrag geleistet haben. Solche Vorgänge vermuten Forscher etwa bei der Artbildung von Nagetieren.[22]

Evolution von Populationen

Die biologischen Arten und auch ihre einzelnen Populationen unterscheiden sich beträchtlich hinsichtlich der Struktur und Kopienzahl ihrer TE-Sequenzen [23] (siehe Tabelle S. 46). Die Anzahl der Gene in einem Genom steigt zwar von Bakterien hin zu höheren Organismen. Dennoch korreliert die Genomgröße nicht mit der Komplexität einer Spezies. Sondern den Hauptunterschied bezüglich dessen Umfang macht der Anteil an TEs und anderen sich wiederholenden Sequenzen aus.

Nach populationsgenetischen Erwägungen kann die Genomgröße allein deswegen zunehmen, weil eine Population klein ist – sozusagen als passive Folge der geringen Individuenzahl.[24] Denn in kleinen Populationen haben es Selektionskräfte schwerer, gegen nachteilige Auswirkungen von TE-Einschüben vorzugehen. Der Zufall bekommt mehr Gewicht. Folglich können sich transponierbare Elemente manchmal leichter anhäufen. Dennoch können die Forscher noch nicht entscheiden, ob sich die Populationsgröße – indirekt – auf die Genomgröße auswirkt oder ob nicht vielmehr Umweltstress oder neue Umweltbedingungen, etwa in einem frisch eroberten Lebensraum, den Genomumfang direkt fördern. Die Antwort hierauf berührt zum Beispiel auch das Verständnis von Anpassungen in der Menschheitsgeschichte – wie die Frage, was mit dem Genom früher Menschen geschah, als sie von Afrika her andere Erdteile besiedelten.

Zwar benötigen wir Analysen von Genomen vieler biologischer Arten, um die Unterschiede in deren Größe und Aufbau zu erkennen. Dieser Ansatz liefert aber wenig Aufschluss über die Mechanismen, welche die Erbsubstanz formten. Um das zu verstehen, müssen wir die Genome von möglichst vielen verschiedenen Populationen derselben Art untersuchen und dazu die jeweiligen Umweltbedingungen mit einbeziehen. Wie sich beispielsweise für die Taufliege *Drosophila melanogaster* herausstellte, schwankt die Menge von TE-Kopien zwischen den Populationen stark. Manche TEs sind sogar Neueindringlinge, die von fremden Arten stammen – ein so genannter Horizontaltransfer.[25] Von einer Reihe springender Elemente halten die Forscher für möglich, dass es in der Evolution Zeiten gab, in denen sie sich breitmachten, und andere, in denen sie vermehrt verloren gingen. Im Humangenom etwa scheinen manche Lines auf dem Vormarsch zu sein, andere dagegen werden wohl gerade ausgesondert.[26] Inwieweit diese Vermutung zutrifft, müssten Untersuchungen an verschiedenen menschlichen Bevölkerungsgruppen erweisen. Solches Datenmaterial erlaubte auch Aufschluss über Kräfte der Natur, welche die Expression von springenden Elementen und Genen kontrollieren und unser Genom formen (Kasten links).

Das nächste Ziel für dieses Forschungsgebiet ist klar gesteckt: Es gilt, die Zusammenhänge aufzudecken zwischen Umstellungen der epigenetischen Genregulierung während früher und später Entwicklungsphasen auf der einen Seite und Veränderungen von Umweltbedingungen, Genomgröße, Populationsumfang und -aufbau auf der anderen Seite. Einige Modellsysteme, die sich zur Erforschung solcher Zusammenhänge eignen würden, haben die Wissenschaftler in letzter Zeit gefunden. Beispielsweise spürten sie Unterschiede in der Genexpression bei genetisch identischen Labormäusen auf.[27] Beim Zahnkärpfling *Fundulus heteroclitus*, einem in Nordamerika verbreiteten Gründling, variiert in verschiedenen natürlichen Populationen die gewebsspezifische Genexpression.[28] Auch bei der Acker-Schmalwand *Arabidopsis*, dem Paradepferd der Genetik unter den Blütenpflanzen, entdeckten Forscher eine epigenetische Variation, nämlich die stammspezifisch hohe Expression eines Nicht-LTR-Transposons.[29]

Anschließend gilt es, die für diese Phänomene verantwortlichen Mechanismen zu verstehen sowie deren Beteiligung an Krankheiten zu ergründen. Das dürfte erhellen, wie Umwelt und Genotyp zusammenspielen und wie Geno- und Phänotyp verknüpft sind. Was Genetiker einst abschätzig Schrott-DNA nannten, gehört in Wahrheit zu den Hauptakteuren im Genom, sei es, um das Erbgut zu gestalten oder um Genaktivitäten zu kontrollieren. ◁

Christian Biémont und **Cristina Vieira** forschen im Labor für Biometrie und Evolutionsbiologie, UMR 5558, CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, 69622 Villeurbanne Cedex, Frankreich.
E-mail: biemont@biomserv.univ-lyon1.fr

© Nature Publishing Group (www.nature.com/nature)

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Das heimliche Wirken der Pseudogene. Von Mark Gerstein und Deyou Zheng in: Spektrum der Wissenschaft 4/2007, S. 58

Das neue Genom. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/2006

Alle Indexzahlen im Text verweisen auf die Referenzen der Original-Literaturliste. Diese finden Sie mit weiteren Links unter www.spektrum.de/artikel/869370.

Ganz Gallien war besetzt!

Kein kleines Dorf, das da Widerstand geleistet hätte. Im Gegenteil: Aus kriegerischen Kelten wurden brave Bewohner des römischen Imperiums.

BRIDGEMAN GIRAUDON (LIONEL N. ROYER. VERCINGETORIX WIRFT CÄSAR SEINE WAFFEN ZU FÜSSEN. 1899. MUSÉE CROZATIER, LE PUY-EN-VELAY, FRANKREICH)

Schwerpunkt Gallien

Ganz Gallien war besetzt! S. 50
Feindbild Gallier S. 58
Die Mär vom heiligen Hain S. 62

Von Daniel Paunier

Nach einer mörderischen Entscheidungsschlacht vor den Mauern des gallischen Oppidums Alesia befiehlt der siegreiche Caesar, »dass man ihm die Waffen abgebe, dass man ihm die Anführer der Stämme bringe … Man liefert ihm Vercingetorix aus, man wirft ihm die Waffen zu Füßen«. Dieser nüchterne Eintrag des Siegers in seinem Bericht über den großen Krieg scheint dem Ereignis kaum gerecht zu werden: Caesar hatte im Herbst des Jahres 52 v. Chr. das Kernland der Kelten erobert, und unter dem Druck der Imperialmacht, so die gängige Meinung, verschwand bald eine ganze Kultur vom Kontinent samt Kunst, Religion und Sprache. Doch Wissenschaftler glauben heute: Der Romanisierungsprozess war auch schon vor dem Krieg im Gang.

Gallien hatte als politische Einheit nie existiert – Caesar selbst gab dem von ihm eroberten Gebiet zwischen Pyrenäen und Rhein, zwischen Atlantik und Alpen, erst diesen Namen. Zuvor lebten dort verschiedene Stämme der Kelten (siehe Karte nächste Seite). Obwohl sie in der römischen Propaganda gern als kulturlose Barbaren dargestellt wurden (siehe den folgenden Beitrag), waren sie alles andere als das. Seit mehreren Jahrhunderten schon standen Vertreter dieser Kultur mit der mediterranen Welt in Kontakt, sei es durch Handel, Eroberungszüge oder Söldnerdienst, durch die Nachbarschaft zu griechischen Kolonien oder – Ende des 2. Jahrhunderts v. Chr. – als Folge der Eroberung der Gallia transalpina genannten römischen Provinz. Diese Kontakte trugen das ihre dazu bei, die keltische beziehungsweise die gallische Gesellschaft zu verändern.

Dass die zur Zeit der Invasion Caesars längst im Umbruch war, verraten zum Beispiel die ab dem 2. Jahrhundert v. Chr. gegründeten Oppida (siehe Kasten S. 55). Diese befestigten Höhensiedlungen zeigten bereits Merkmale von Städten: mehrere hundert Hektar Fläche, öffentliche Gebäude, ein umlaufender Sperrwall, in der Umgebung Straßen und Brücken. Zuvor hatten die Gallier nur Dörfer und Weiler gekannt, nun lebten ihre Fürsten in regionalen politischen und religiösen Zentren, in denen sich Handwerk und Handel konzentrierten.

Wie nahe sich die beiden Kulturen längst gekommen waren, beweisen auch die Präsenz gallischer Anführer in Caesars Generalstab oder der Empfang des Haeduerfürsten Diviciacus im Haus des römischen Politikers Cicero gegen 60 v. Chr.; der Gallier durfte sogar vor dem römischen Senat sprechen. Es besteht kein Zweifel, die gallische Gesellschaft war längst dabei, sich der mediterranen Welt zu öffnen. Natürlich entwickelte sich dies auf dem Hintergrund der eigenen Kultur. So übernahmen gallische Künstler zwar die griechisch-römische Bildhauerei als Ausdrucksform, doch diente sie nicht profanen Zwecken, son- ▷

Vercingetorix streckt die Waffen in Alesia im Jahr 52 v. Chr. Diese dramatische Darstellung des Malers Lionel Royer demonstriert die Sichtweise des 19. Jahrhunderts auf die Unterwerfung Galliens: Eine Kultur wird zerstört. Heute sieht man das Verschwinden keltischer Traditionen differenzierter – es war großteils von der einheimischen Elite gewollt.

dern war Teil von Bestattungsbräuchen und Heldenverehrung. Auch tragen die Bildnisse aus der Zeit des »freien Gallien« einheimische Stilmerkmale. So sitzen die Dargestellten oft im Schneidersitz, tragen keltische Accessoires wie Gewandspangen, Halsreifen oder Blattkronen. Ein zweites Beispiel für die Verschmelzung keltischer und römischer Kultur: Die Gallier importierten Wein aus dem Mittelmeerraum, sie setzten ihn aber hauptsächlich bei religiösen Festen, nicht bei profanen Gelagen ein. Mit der Eroberung hatte die Romanisierung Galliens also keineswegs begonnen, sie wurde jedoch beschleunigt und verstärkt.

Tausende waren im großen Krieg auf den Schlachtfeldern gefallen, bei Strafaktionen niedergemetzelt oder in die Sklaverei verkauft worden. Den Überlebenden, vermutlich fünf bis zehn Millionen Menschen, kam das Imperium nun mit einer auf Integration gerichteten Strategie entgegen. Zwar galten römische Gesetze, durchgesetzt von einer straff organisierten Verwaltung; Latein war offizielle Amtssprache. Doch vieles blieb beim Alten, nicht zuletzt respektierte die neue Einteilung Galliens unter Kaiser Augustus in etwa sechzig Kleinstaaten zumeist die früheren Stammesgebiete (siehe Kasten). Das politische und administrative Zentrum konnte ein bestehendes Oppidum sein. Wo dergleichen nicht existierte, erfolgte die Gründung einer neuen Stadt. Die Kleinstaaten wiederum waren drei gallischen Provinzen zugeordnet: Belgica zwischen Rhein und Seine, Lugdunensis zwischen Seine und Loire und Aquitania südlich der Loire (kleine Karte).

Eingeschworen auf den Kaiser

Wie im fernen Rom regierte auch in den Zentren jeweils ein Senat (siehe Kasten S. 56), wurden alljährlich die Vertreter einer Stadtverwaltung gewählt, regelte die römische Ämterlaufbahn den Aufstieg in der gesellschaftlichen Hierarchie. Sogar die Tradition der Stammesversammlungen lebte in romanisierter Form wieder auf. Jedes Jahr traf sich der Rat der drei gallischen Provinzen in Condate bei Lyon. Er setzte sich aus Abgeordneten der Gemeinden zusammen und wurde von einem römischen Priester geleitet. Des Rats wichtigste Aufgabe war es zwar, Treue zum Kaiser zu bekunden, doch hatte er vermutlich auch andere Funktionen wie die Verwaltung öffentlicher Gelder; zudem nahm er Beschwerden über die Provinzverwaltung entgegen.

So konnten die Adligen ihren Rang wahren, ja, Rom hatte sogar ein Interesse daran, loyale Vertreter der Elite an der Macht zu halten. Doch die Eigenständigkeit der sechzig Kleinstaaten hatte ihre Grenzen. Wichtige Kompetenzen wurden jetzt von Vertretern Roms wahrgenommen, so die Kontrolle über die Armee und das Steuerwesen, das Prägen von Münzen, die Einnahme von Wegegeldern und die Verwaltung wichtiger Minen.

Dennoch: Die Honoratioren arrangierten sich und wurden zu Trägern der Veränderung Galliens. Wie früher hatten sie ihren Grundbesitz auf dem Land, wo sie gern ihre letzte Ruhestätte errichteten, ein oftmals prächtiges Monument, Spiegel ihres Status und Überbleibsel alter Traditionen aus der Zeit der Unabhängigkeit. Doch nun verbrachten sie einen großen Teil ihrer Zeit in der Stadt. Die veränderte sich radikal und nach römischem Vorbild, angefangen bei den rechtwinklig verlaufenden Straßenzügen bis hin zum Forum, dem Mittelpunkt des urbanen Lebens in den Mittelmeer-

Galliens politische Landschaft

Caesar kam, sah – und erfand. Das Gallien, das er für Rom eroberte, hat es nie gegeben.

Von Stephan Fichtl

»Gallien in seiner Gesamtheit ist in drei Teile aufgeteilt, von denen einen die Belger besiedeln, den anderen die Aquitanier, den dritten diejenigen, die in ihrer eigenen Sprache Kelten, in unserer Gallier genannt werden.« So schrieb Caesar im ersten Kapitel seines Kriegsberichts. An späterer Stelle erfuhr der Leser: »Die Gallier sind von den Aquitaniern durch die Garonne, von den Belgern durch die Marne und die Seine getrennt.« Das Werk bleibt der wichtigste Text über die politische Organisation eines Gebildes, das vor der Eroberung durch Caesar paradoxerweise gar nicht existierte.

Keinem Kelten – das eroberte Gebiet umfasste den Westen des keltischen Kulturbereichs – wäre vor der Invasion in den Sinn gekommen, sich als Einwohner eines Staatsgebildes namens Gallien zu sehen. Eher dürften sie sich als »Gallier« empfunden haben, so wie wir uns heute als Einwohner Europas betrachten. Caesar unterwarf für Beute und Karriere ein Gebiet, das heute dem Gebiet Frankreichs und den Beneluxländern, dem Westen Deutschlands und dem Schweizer Mittelland entspricht; der Rhein diente als natürliche Grenze. Was er als »Gallien« dem Imperium einverleibt hatte, sollte sogar bis zur Neugliederung des Reichs durch Kaiser Augustus einen unklaren rechtlichen Status behalten. Erst dann wurde daraus eine gallische Provinz, unterteilt in drei Verwaltungsbereiche; den Nordosten des von Caesar eroberten Gebiets gliederte Augustus als Germania inferior und superior aus.

Freilich wüssten Archäologen und Althistoriker gern, wie die politische Landschaft dieses Gallien vor der Invasion ausgesehen hat. Eine recht gute Hilfe geben die Grenzen der katholischen Diözesen des Hochmittelalters, denn sie beruhten auf der weiteren römischen Unterteilung der Provinzen in so genannte »civitates«. Diese aber orientierten sich an den etwa sechzig Stammesgebieten des 1. Jahrhunderts v. Chr. (siehe große Karte).

Es gibt leider nur wenige Berichte über die verschiedenen Stämme. Doch das wenige, das Caesar und einige antike Historiker überliefert haben, verbinden wir heute mit archäologischen Befunden und können daher Aussagen treffen. Einige Stämme waren offenbar bedeutender als andere. So dominierten in dem von Caesar als keltisch bezeichneten (Gallia comata) und unter Augustus zur Provinz Lugdunensis zusammengefassten Gebiet zwei Völker: die Haeduer im heutigen Burgund und die Sequaner in der Franche-Comté. Beide rangen um die Kontrolle über die Saône, denn dieser Fluss bildete eine der wichtigsten Handelsachsen Galliens. Die Haeduer sollten den Sieg davontragen – dank der Unterstützung durch Caesar, sie waren seine Hauptverbündeten im Gallischen Krieg. Noch ein Jahrhundert zuvor hätte er sich mit einem anderen Stamm einigen müssen: den Avernern. Laut dem römischen Historiker Poseidonios (135 – 51 v. Chr.) kontrollierten diese im 2. Jahrhundert v. Chr. ein Gebiet, das vom Mittelmeer und den Pyrenäen im Süden bis zum

BEIDE KARTEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK; GROSSE KARTE NACH: STEPHAN FICHTL

Die politische Landschaft Galliens, wie Caesar sie antraf, entsprach einem losen Stammesverbund (rechts; in diesem Schwerpunkt erwähnte archäologische Stätten sind rot eingetragen). Auch wenn das eroberte Gebiet oft schon als Provinz bezeichnet wurde, erhielt es doch erst durch Kaiser Augustus die nötige Verwaltungsstruktur. Dabei wurden zwei germanische Provinzen ausgegliedert, das übrige Gallien in drei Teilprovinzen unterteilt (Gallia Narbonensis gehörte als Gallia transalpina schon vor dem Gallischen Krieg zum Reich).

Rhein im Osten und dem Atlantik im Westen reichte. Allerdings darf man sich darunter kein Staatsgebilde in der Art des Römischen Reichs vorstellen, sondern lediglich eine politische und wirtschaftliche Vorherrschaft. Averner waren es übrigens, die im 2. Punischen Krieg (218 – 201 v. Chr.) den Karthager Hasdrubal Barkas bei seinem Zug durch die Gallia transalpina unterstützten – er versuchte vergeblich, seinen in Italien kämpfenden Bruder Hannibal mit Nachschub zu versorgen. Doch zur Caesars Zeit war der Stern der Averner bereits verblasst, ihr Territorium im Wesentlichen auf die heutige Region Auvergne im Zentralmassiv geschrumpft. Einer ihrer Hauptorte war das Oppidum von Gergovia, oberhalb von Clermont-Ferrand gelegen, bekannt durch den Sieg ihres Fürsten Vercingetorix über die römischen Truppen im Jahr 52 v. Chr.

Den Norden Galliens, in etwa begrenzt durch Marne und Seine, besiedelten die Stämme der Belger, wie Asterix-Kenner wissen, laut Caesar die mutigsten aller Völker Galliens. Der wichtigste Stamm zur Zeit der Eroberung waren die Suessionen, deren König Galba sogar Gebiete auf den britischen Inseln beherrschte. Sie siedelten im heutigen Aisnebecken um die nach ihnen benannte Stadt Soissons. In direkter Nachbarschaft lebten ihre kriegerischen Konkurrenten, die Bellovaker, die stolz darauf waren, als Einzige in Gallien die germanischen Kimbern und Teutonen zu Anfang des 2. Jahrhunderts v. Chr. aufgehalten zu haben.

Östlich der Belger trafen die römischen Legionen auf die Treverer, die mal ihre Gegner, mal ihre Verbündete waren. Ihr Hauptoppidum lag auf dem Titelberg im heutigen Luxemburg (siehe S. 55). Ausgrabungen brachten einen etwa zehn Hektar großen Platz ans Licht, der zu einem Heiligtum gehörte. Caesar erwähnte mehrmals die Bedeutung von Versammlungen für das politische und religöse Leben der Gallier. Sie konnten auf der Ebene eines Stamms, einer Region oder ganz Galliens einberufen werden. Es ist verführerisch, diesen freien Platz als einen solchen Ort der Zusammenkünfte zu deuten.

Zu Zeiten der Unabhängigkeit war das von Caesar erwähnte Aquitanien nur eine kleine Region zwischen den Pyrenäen und der Garonne. Erst die Neuaufteilung Galliens unter Augustus erweiterte seinen Machtbereich bis zur Loire.

Wenn man von Gallien spricht, wird eine Region oft vergessen, nämlich sein südlicher Teil. Als Gallia transalpina wurde es bereits zwischen 125 und 119 v. Chr. von Rom erobert. Caesar war vor seinem Feldzug Prokonsul dieser Provinz (außerdem Prokonsul des als Oberitalien bezeichneten, ehemals von Kelten beherrschten Gallia cisalpina). Zu den wichtigen Völkern dieser Region zählten die Salluvier, die im 2. Jahrhundert v. Chr. einen mächtigen Stammesbund gegen die griechische Kolonie Marseille bildeten. Die meisten südgallischen Stammesgebiete waren deutlich kleiner als die nördlichen. Während die römische Verwaltung diese Geografie fixierte, wuchsen vermutlich in Zentralgallien größere Territorien zusammen, bis Caesar auf dem Plan erschien.

Stephan Fichtl ist Professor für Archäologie an der Universität François Rabelais in Tours.

▷ ländern. Umgeben von Säulengängen gehörten verschiedene öffentliche Gebäude zu seiner Ausstattung wie die Gerichtsbasilika und die Kurie des Senats. Das beherrschende Gebäude des Forums aber war der klassische, meist dem Kaiserkult gewidmete Tempel. Obligatorsch für eine Stadt mediterraner Prägung waren überdies Gebäude, in denen sich die Städter entspannten und erholten. In den öffentlichen Bädern, Theatern und Amphitheatern konnten sich die Angehörigen aller Bevölkerungsschichten als Mitglieder ein und derselben Gemeinschaft fühlen. Wer reich und mächtig war, ließ wie früher auch alle am Reichtum teilhaben. Doch anstatt Feste und Bankette auszurichten, investierten die Vornehmsten in öffentliche Bauten.

Nicht nur im Großen veränderte sich das Bild der Städte, sondern auch in architektonischen Details. Eine geradlinige Straßenführung und Aquädukte waren zuvor nicht üblich. Mauerwerk, gebrannter Lehm und Kalkmörtelputz verdrängten Fachwerk und Blockbau. Auch die Ausstattung der Häuser selbst wurde komfortabler. Fußbodenheizung und Wasserleitung konnten sich freilich nur die Reichen leisten, ebenso wie Fresken, Mosaiken und Stuckverzierungen nach römischem Vorbild.

Gallische Sporen für römische Ritter

Von manchen Annehmlichkeiten mediterranen Lebensstils profitierten aber auch einfache Menschen. Freilich stellte sich für sie der Alltag unter römischer Herrschaft anders dar. Würden sie auch weiterhin in der Lage sein, ihrem jeweiligen Gewerbe nachzugehen, entstünden ihnen Vor- oder Nachteile? Doch Rom wollte aus seinen Provinzen Nutzen ziehen und war deshalb bemüht, deren Wirtschaftskraft zu fördern, nicht sie zu zerstören. Dementsprechend öffnete die Eroberung den gallischen Handwerkern neue Märkte. Seit Generationen führend in der Verarbeitung von Leder und Metallen, belieferten sie beispielsweise bald die Kavallerie der Eroberer mit Sätteln und Sporen. Von der effizienten Verwaltung profitierten die Kaufleute, denn nun galten allgemeine Regeln für den Handel, das Währungs- und Gewichtssystem wurde vereinheitlicht. Gute Straßen erschlossen das Land, auch die Schifffahrt florierte, ein leistungsfähiges Kommunikationsnetz unterstützte den Fernhandel.

Innovationen gab es auch in der Landwirtschaft. Wein wurde angebaut und in das Reich exportiert, die aus dem Mittelmeerraum stammende Spindelpresse und die Wassermühle erleichterten die Verarbeitung von Feldfrüchten. Die findigen Handwerker Nordgalliens reagierten auf den Boom und entwickelten eine Art Mähmaschine, die die Ähren abzuschnitt und in Behälter füllte. Viehzüchter importierten robustere und rentablere Rassen aus Italien.

Kurz: Gallien erlebte unter den Besatzern einen nie da gewesenen Wirtschaftsaufschwung. Doch zugleich ging dabei die gallische Kultur in rasantem Tempo verloren. In Schulen ließen die Noblen freiwillig ihre Kinder in der römischen Kultur unterweisen. Selbst Personennamen wurden römisch. Das keltische Erbe beschränkte sich bald darauf, Entfernungen in gallischen Meilen zu messen – je nach Region zwischen 2200 und 2400 Metern – und traditionelle Kleidung zu tragen, wie den Waffenrock mit Ärmeln und den Vorläufer der Hose. Aber dieser Rest kultureller Identität war nicht so trennend, denn die Römer übernahmen ihrerseits die Hosen zusammen mit den gallischen Lederschuhen. Und so wie die Kelten begannen, Brot, gekochtes Fleisch und Fischsoßen zu essen, entdeckten die Besatzer das Bier und den Gemüsebrei.

Auch Künstler vermochten die gallischen Traditionen nicht zu bewahren, griechisch-römische Stilelemente ersetzten das originär Keltische. Fortan galt es beispielsweise in Bildnissen formale Schönheit und Harmonie zu präsentieren. Deshalb waren Porträts idealisiert, wobei das des Kaisers stets Göttlichkeit widerspiegelte. Nur wenige Statuen aus Holz oder Bronze zeigten Personen noch mit traditioneller Haartracht und typisch keltischem Schmuck. Gallische Dekorationsmotive erhielten sich allenfalls noch auf Zierscheiben von Pferdegeschirr oder Harnisch und Bronzeetuis. Und in all solchen heute bekannten Beispielen lässt

BEIDE BRONZEFIGUREN: HISTORISCHES MUSEUM BERN, FOTO: STEFAN REBSAMEN

Die 42 Zentimeter hohe Statuette aus Bronzeblech (links) zeigt eine Gottheit oder einen Heroen in der Manier gallischer Künstler vor der Eroberung: mit Hirschfüßen, einem Halsring als Schmuck und im Schneidersitz. Der Kopf erscheint zu groß, die Haare wurden als stilisierte Strähnen dargestellt, Wimpern und Augenbrauen durch Riefen wiedergegeben. Ein Jahrhundert nach der Invasion orientierten sich die Künstler bereits an der griechisch-römischen Formensprache, wie ein Bronzekopf zeigt (rechts, 26,5 Zentimeter hoch), der bei Lausanne in der Schweiz ausgegraben wurde. Die Gestaltung der Haare und der Schnurrbart stehen jedoch nach wie in der einheimischen Tradition.

BEIDE MÜNZEN: AKG BERLIN

Diese römischen Münzen stellen vermutlich beide Vercingetorix dar, den Anführer der gegen Kriegsende vereinigten gallischen Stämme. Doch während die linke dem Klischee des schnauzbärtigen Galliers mit wilder Haartracht folgt, illustriert die rechte möglicherweise, dass sich die gallische Kultur längst den Gewohnheiten der römischen angenähert hatte.

sich nicht entscheiden, ob eine Absicht dahinterstand, also das bewusste Aufgreifen volkstümlicher Stilelemente, oder lediglich die Ungeschicklichkeit lokaler Handwerker, die es nicht anders ausführen konnten.

Schlechter war es offenbar um die Dichtung bestellt, denn Latein verdrängte die keltischen Idiome. Einfache Menschen, insbesondere auf dem Land, dürften vermutlich noch lange ein Kauderwelsch gesprochen haben. Archäologen kennen aus der Zeit nach der Eroberung auch durchaus gallische Inschriften wie »Guten Tag, meine Schöne« oder »Gib mir Met« auf Ringen, Spindeln und Webgewichten, außerdem magische Texte in Bleiplatten, Mondkalender in Bronze, Töpferrechnungen auf Geschirrteilen. Inschriften in Stein aber, wie sie öffentliche Gebäude oder Grabstelen zieren, wurden ab Mitte des 1. Jahrhunderts n. Chr. nur noch in Latein verfasst. So kommt es, dass die französische Sprache heute mit Ausnahme von Ortsnamen kaum mehr als hundert Wörter gallischen Ursprungs wie »alouette« für Lerche, »caillou« für Kiesel oder »char« für Wagen kennt. Mit der Sprache aber ging auch die hauptsächlich mündlich überlieferte Literatur der Gallier verloren.

Damit blieb als letztes mögliches Bollwerk für den Erhalt ethnischer Identität die Religion. Und tatsächlich: Die gallischen Ahnengötter verschwanden nicht, behielten ihre Namen und auch ▷

Die Oppida – Hierarchie der Keltenstädte

Archäologen bestätigen Berichte Iulius Caesars.

Wären die Gallier wirklich so unzivilisiert gewesen, wie in der Antike gern behauptet wurde (siehe den vorigen Beitrag), hätte sich Caesar schwerer getan, das Land zu erobern. Um Tausende von Legionären mit allem Notwendigen zu versorgen, musste eine Infrastruktur bereits vorhanden sein. Tatsächlich fand er in Gallien dieselbe Aufteilung der Territorien vor wie in der antiken Welt des Mittelmeerraums: hier die ländlichen, Nahrung und Rohstoffe produzierenden Gebiete, dort die Oppida, politische, wirtschaftliche und religiöse Zentren mit städtischem Gepräge. Sie waren innerhalb nur einer Generation im letzten letzten Drittel des 2. Jahrhunderts v. Chr. entstanden und nahmen mehrere Dutzend, manche sogar hundert Hektar an Fläche ein.

Experten vermuten heute, dass es eine Hierarchie unter ihnen gab und manches mit Fug und Recht als Hauptstadt eines Stamms anzusprechen sei. Vesontio zum Beispiel, das heutige Besançon, war laut Caesar »das wichtigste Oppidum der Sequaner« (siehe große Karte S. 53). Avaricum, heute Bourges, bezeichnet er als »das schönste von ganz Gallien, das die Stärke und die Zierde des Stammes ist« und »das bedeutendste und am besten verteidigte«. Bibracte auf dem Mont Beuvray sei »bei Weitem das größte und reichste Oppidum der Haeduer«.

Nicht von ungefähr also wurde dort der Averner Vercingetorix 52 v. Chr. zum Oberbefehlshaber der gallischen Armeen gewählt, ein gewaltiger Schritt für die bis dahin getrennt operierenden Stämme. Und in Bibracte brachte Caesar später seine Kommentare zum Gallischen Krieg, die »Commentarii rerum gestarum belli Gallici« zu Papier.

An allen diesen Stätten graben Archäologen, bei Bibracte wurde sogar ein Europäisches Archäologisches Zentrum gegründet, das auf die Untersuchung der keltischen Kultur spezialisiert ist. Die bisherigen Erkenntnisse stützen Caesars Einschätzung, diese drei Orte seien so etwas wie Hauptstädte gewesen. Das belegt allein schon die jeweilige Größe, ein Kriterium, das auch andere Oppida in eine Rangfolge einzuordnen hilft. Ein gutes Beispiel ist Fossé des Pandours am Col de Saverneder im heutigen Elsass, mit geschätzten 160 Hektar offenbar das Zentrum der Mediomatriker. Andere Oppida dieses Stammes hingegen nahmen nicht einmal ein Zehntel dieser Fläche ein. Auch ein großer Versammlungsplatz wie im Oppidum auf dem luxemburgischen Titelberg spricht für eine Zentralfunktion.

Casear hätte sich durch die reine Grösse aber wohl nicht allein überzeugen lassen – in der römischen Welt zeigte sich die politische Bedeutung eines Orts auch an seinen Monumenten. Doch für die Welt der Oppida traf dies offenbar ebenfalls zu. Wall- und Toranlage waren wichtige Bauelemente, und in manchen Städte zeichneten sie sich durch ungewöhnliche Ausmaße oder eine besondere Ausführung aus. So schmückte den Wall von Fossé des Pandours eine Mauerfassade aus behauenen Steinblöcken. Diese Technik war in der keltischen Welt sehr selten und sollte vermutlich schlicht beeindrucken. Ein anderes Beispiel ist die Porte du Rebout von Bibracte. Dieses monumentale Tor der Haeduer war 21 Meter breit und damit bei einem Angriff nicht zu halten. Offenkundig erfüllte es andere Funktionen als die der Verteidigung, etwa die Repräsentation von Macht oder die Abgrenzung der ländlichen von der urbanen Welt.

Stephan Fichtl

Könige und Senatoren

Wer sich gallische Stammesführer als dickbäuchige Häuptlinge vorstellt, die auf ihrem Schild durchs Dorf getragen werden, irrt.

Nicht nur die geografische Strukturierung der gallischen Territorien in Land und Stadt und die Rangordnung unter den Oppida in bedeutendere und weniger bedeutendere widerlegen das Vorurteil der Römer und Griechen, die Kelten seien unzivilisierte Barbaren gewesen. Auch wenn die Asterixcomics, sozusagen Galliens späte Rache an den Römern, das Häuptlingswesen in den Vordergrund stellen, herrschten in den Stämmen tatsächlich andere weit fortgeschrittene Formen der Regierung.

Antike Texte überliefern zahlreiche Namen von Königen. So betonten mehrere Autoren den großen Reichtum von Luernios, dem König der Arverner um die Mitte des 2. Jahrhunderts v. Chr. Dem griechischen Historiker und Geografen Strabon (63 v. – 23 n. Chr.) zufolge soll er einmal, nur um seinen Überfluss zu beweisen, von einem Wagen aus Gold- und Silberstücke in die Menge geworfen haben.

Doch solches Machtgehabe verschwand bis Anfang des 1. Jahrhunderts v. Chr. Caesar hatte es nicht mehr mit Königen, sondern mit Oligarchien zu tun. Jeder Stamm wurde von einem Senat regiert, zusammengesetzt aus je einem Vertreter einer wichtigen Familie. So umfasste dieses Gremium mitunter mehrere hundert Personen. Diese ernannten Beamte, von Caesar Magistrate genannt, denen bestimmte Aufgaben oblagen.

MIT FRDL. GEN. VON STEPHAN FICHTL

Leider kennen wir aus den Berichten antiker Historiker und aus Inschriften nur wenige Einzelheiten. Der heute bekannteste Titel ist sicher der »Vergobret« der Haeduer. Wie das des römischen Konsuln war es das höchste Amt und wurde für ein Jahr vergeben. Doch der Vergobret hatte weitaus mehr Macht als sein Kollege in Rom: Er musste sie nicht mit einem anderen teilen und er entschied auch über Leben und Tod.

Während die Konsuln auch die militärische Oberbefehlsgewalt innehatten, durfte der Vergobret das Stammesgebiet nicht verlassen. Im Kriegsfall führte offenbar ein anderer Beamter die Armee an.

Ob es Vergobreten bei allen Stämmen gab, lässt sich nicht beweisen, doch die Annahme liegt nahe, dass es bei den meisten der Fall war. Allerdings gab es auch andere Ausprägungen des höchsten Amts. Das zeigt das Beispiel des Magistrats Vesticos, der den Schriftquellen zufolge dem Stamm der Remer angehörte, aber im Kampf auf dem Gebiet der Bellovaker fiel. Vermutlich teilten sich bei den Remer gleich drei Beamte die Macht. So jedenfalls deuten Wissenschaftler Bronzemünzen dieses Stammes, die auf der Vordereite drei Köpfe im Profil zeigen.

Inschriften auf Münzen verraten auch, dass es die Ämter »argantodannos« und »argantocometerecus« gab, doch deren genaue Funktion ist bekannt. Immerhin: Diese Titel setzen sich aus gallischen Begriffen zusammen, die eine enge Verbindung zum Münzwesen andeuten: »argantо« bedeutet Geld und »dannos« Magistrat.

Sehr wahrscheinlich war diese Herrschaft der Aristokraten von den mediterranen Vorbildern inspiriert. Doch sie erwies sich als zerbrechlich. Machtkämpfe waren an der Tagesordnung, und wiederholt versuchten einzelne, die Monarchie wieder einzuführen.

Kurz bevor Caesar in Gallien einfiel, verbündeten sich beispielsweise Orgetorix, einer der wohlhabendsten und einflussreichsten helvetischen Adligen, Casticos, Sohn des letzten Sequanerkönigs, sowie Dubnoreix (auch Dumnorix), der Bruder des Haeduerführers und Caesarverbündeten Diviacus, um in ihren Stämmen die Königswürde durchzusetzen – vergeblich. Ein durchaus riskantes Unternehmen, wurde doch der Averner Celtillos, Vater des Vercingetorix, bei lebendigem Leib verbrannt, weil er die Königswürde anstrebte.

Auch Dumnoreix' Umsturzversuch wurde vereitelt, der Fürst von den Römern getötet. Schließlich war Diviacus ein langjähriger Verbündeter Caesars. In anderen Fällen machte sich der aber das Machtstreben Einzelner durchaus zu Nutze: An die Spitze besiegter Stämme setzte er einen König, der ohne Zweifel leichter zu lenken war als eine große Gruppe Adliger.

Stephan Fichtl

AKG BERLIN (SILBERMÜNZE)

Dubnoreix, ein Adliger der Haeduer, strebte nach der Königswürde.

▷ ihr mythologischer Ursprung wurde nicht umgedeutet. Status und Erscheinung aber änderten sich. Pflicht war, sie dem römischen Pantheon einzuverleiben, wo sie nach Jupiter und dem regierenden Kaiser rangierten. Ihre Darstellung entsprach ebenso wie die Architektur der Heiligtümer griechisch-römischen Gepflogenheiten, eine Entwicklung, die wohl durchaus freiwillig erfolgte. Der Opferplatz, einst nicht mehr als ein umzäunter Bereich um einen Altar, wurde zum Tempel (siehe auch Bild S. 63). Schutzgötter des Herds, die mit dem neuen Pantheon ins Land gekommen waren, bereicherten das religiöse Leben durch die im Mittelmeerraum üblichen Hauskulte.

Auch im Bestattungsbrauch setzten sich römische Sitten durch. Die Tradition der Grabhügel mit Grabkammer und reichen Beigaben pflegte man zwar bis ins 3. Jahrhundert, doch verlor sie danach an Bedeutung. Wer auf sich hielt und mit der Zeit ging, ließ sich in einem gemauerten Schrein bestatten oder gar in einem imposanten Mausoleum. Zumindest aber ließ er eine Grabstele aufstellen, die der Nachwelt durch Inschrift und Relief über den Verstorbenen berichtete.

Eine Personengruppe dürfte sich mit den Veränderungen nur schwer abgefunden haben: die im alten Gallien einflussreichen Druiden. Die Funktion des Priesters war im Imperium den Vertretern der Staatsmacht vorbehalten. Drei »Berufsverbote«, ausgesprochen von den aufeinanderfolgenden Kaisern Augustus, Tiberius und Claudius waren offenbar erforderlich, diese keltische Tradition radikal zu durchbrechen.

Nur in den vor römischem Einfluss geschützten Regionen Irland, Schottland, Wales und einem Teil Cornwalls blieben die Kelten ihrer Kultur verbunden. Als das Römische Reich unterging, besetzten diese Völker zwischen 450 und 670 die Bretagne und brachten vergessenes Brauchtum zurück. Das Christentum schließlich, durch irische Mönche in Gallien verbreitet, integrierte alte keltische Traditionen. So wurde aus den Feuern zur Sonnenwende das Johannisfeuer zu Ehren Johannes des Täufers; und wo heilige Quellen und Bäume fest im Volksglauben verankert waren, errichteten die Missionare Kapellen und Kirchen. Die Diözesen umfassten oft das Gebiet der einst von den Römern eingerichteten Kleinstaaten, geleitet von gallischen Adeligen. Und in Lyon, der alten Hauptstadt der Gallier, residierte – und residiert noch heute – ein Erzbischof als Primas über das Gebiet der ehemals gallischen Provinzen.

Nur Spuren blieben zurück von einer Kultur, die jahrhundertelang Mitteleuropa dominiert hatte. Doch lässt sich dem Imperium kaum der Vorwurf machen, sie ausgerottet zu haben. Der antike Historiker Dion Cassius Cocceianus (160–etwa 229) beschrieb diesen Prozess durch das Bild: »Einheimische, die sich wandelten, ohne es zu merken«. Durch den Kontakt zu den Mittelmeerländern war Gallien bereits auf dem Weg zur Veränderung gewesen. Der römischen Staatsmacht konnte es nur recht sein, dass keltische Eliten trotz des brutalen Kriegs bereitwillig die neue Kultur übernahmen, sodass bald nur noch wenig an das alte Gallien erinnerte. ◁

Der Archäologe **Daniel Paunier** ist Emeritus der Universität Lausanne und Mitglied des Deutschen Archäologischen Instituts.

AUTOR

wichtige**online**adressen

Datenauswertung und Messtechnik
Sensoren, Verstärker, USB-Messkarten
Messprogramme, Auftragsmessungen
Instrumentierung von Prüfständen
www.alles-messen.de

Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI
Entwicklung, Konstruktion, Technische Berechnung, Strömungsmechanik
www.etastern.de

DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

Kernmechanik – Optimiertes Modell: Kernspin + Dipolmomente
www.kernmechanik.de

Prometheus Wissenschaftsfernsehen: Livestream in TV-Qualität
Tägliche Wissenschaftsnachrichten, V-Tipps, TV-Tipps, Reportagen und Dokus
www.prometheus.tv

Consulting für EU-Forschungsanträge im 7. Rahmenprogramm
Energietechnik, Oberflächen, Superisolationen, num. Modellierung
www.haraldreiss.de

Zahnimplantate Krefeld-Zentrum
Einzelzahnversorgung ab 1000,– Euro
www.michael-eichbaum.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon 0211 61 88-579
E-Mail: m.grigo@vhb.de

Feindbild Gallier

Selbst nach der Integration Galliens in das Römische Reich blieben die Klischees von den barbarischen und gefährlichen Kelten noch lange en vogue. Und das war politisch so gewollt.

Von Patrick Thollard

Ein Provinzstatthalter, der öffentliche Gelder veruntreute, korrupt und grausam war – ein klarer Fall für das zuständige Gericht in Rom. Doch als der Fall Marcus Fonteius im Jahr 69 v. Chr. verhandelt wird, verunglimpft sein Verteidiger die Kläger: »Wer weiß nicht, dass diese Menschen bis heute den scheußlichen und barbarischen Brauch beibehalten haben, menschliche Wesen zu opfern?«

Der Anwalt ist kein Geringerer als Marcus Tullius Cicero (106–43 v. Chr.), sein Klient, ein römischer Ritter, regierte die Provinz Gallia Narbonensis (der Süden Galliens mit der Hauptstadt Narbo, dem heutigen Narbonne, gehörte seit 121 v. Chr. zum Reich). Die Kläger aber sind hochrangige Gallier, und damit kann Cicero die römischen Vorurteile gegen die Kelten ausspielen, um diese und ihr Anliegen in ein schlechtes Licht zu stellen.

Er erinnert daran, dass Gallier 387 v. Chr. Rom und 279 v. Chr. das Heiligtum von Delphi geplündert hatten – obwohl beide Vorfälle Jahrhunderte zurücklagen und unterschiedliche keltische Stämme daran beteiligt waren. Denn seine Zeitgenossen unterscheiden nicht zwischen den verschiedenen Völkern – für sie sind sie samt und sonders »Galli comati«, also langhaarige Gallier (lediglich östlich des Rheins siedelnde Stämme wurden als Germanen bezeichnet).

Menschenopfer, grausame Götter, nackte Krieger, Alkoholexzesse, so lauteten einige der zugeschriebenen Klischees. Alle zusammen passten zum »Barbaren«. Mit diesem Wort bezeichneten die Griechen in der Blütezeit ihrer Kultur jene Rassen, die nicht ihre Sprache sprachen und keine mediterrane Lebensweise pflegten. Aus griechischer Sicht waren sie minderwertig, vielleicht bedrohlich, keinesfalls aber sonderlich interessant. Dementsprechend erwähnten Historiker des 6. bis 4. Jahrhundert v. Chr. die Kelten kaum; die wenigen Kommentare wurden oft von Autoren einer späteren Zeit übermittelt. Selbst griechischen Kolonisten, die um 600 v. Chr. in keltischem Gebiet die Stadt Massalia gründeten, das heutige Marseille, hinterließen kaum Berichte über ihre Nachbarn. Lediglich der kleinasiatische Chronist Hekataios von Milet bezeichnete um 500 v. Chr. das Hinterland Massalias und das der ligurischen Küste in Nordwestitalien als »keltike«, also als keltisches Land. Und sein bekannter Kollege Herodot überlieferte im 5. Jahrhundert v. Chr., der Istros, die Donau, entspringe im Land der Kelten.

Kaltes Land am Weltrand

Die spärlichen Nachrichten müssen nicht verwundern. Tatsächlich waren den Griechen alle Barbaren gleichgültig. Das beruhte nicht zuletzt auf den geografischen Vorstellungen jener Zeit. Die bewohnte Welt entspräche einer länglichen Insel auf der Nordhalbkugel der Erde und alle Barbarenvölker lebten am Rande der bewohnbaren Welt: die Kelten im äußersten Westen, die Skythen im Norden, die Inder im Osten und die Äthiopier im Süden. Wozu also sich mit ihnen befassen?

Auch die Vorurteile sind letztlich dieser Verortung geschuldet. Am Rand der Welt mussten extreme Lebensbedingungen herrschen, im Gebiet der Kelten zum Beispiel war es sicher zu kalt für Ackerbau und Viehzucht. Der Philosoph und Naturforscher Aristoteles (384–322 v. Chr.) wusste: »Der Esel ist ein Tier mit kaltem Gemüt. Deshalb, wegen seiner natürlichen Empfindlichkeit für Kälte, vermehrt er sich nicht in Regionen, die einem winterlichen Klima unterworfen sind wie bei den Skythen und in den benachbarten Gebieten. Dies ist ebenso der Fall bei den Kelten, die sich oberhalb der Iberischen Halbinsel befinden, denn das ist eine kalte Gegend.« Unter solchen Umständen – so die Argumentation – lebten diese Menschen zweifelslos vom Krieg. Der aber brachte wiederum Qualitäten wie Furchtlosigkeit und Ausdauer hervor. Zwangsläufig konnte sich in den Randländern auch keine zivilisierte Lebensart ausbilden, dementsprechend würden die Kelten gegen Normen verstoßen, etwa sich häufig betrinken.

Der »Sterbende Gallier« ist ein Symbol der Überlegenheit der »zivilisierten« über die »barbarische« Welt. Das vermutlich in Bronze ausgeführte Original – hier eine römische Marmorkopie – wurde um 230 oder 220 v. Chr. von Attalos I. in Auftrag gegeben. Der König von Pergamon feierte damit seinen Sieg über das keltische Volk der Galater. Nackt hatte sich dieser Krieger in den Kampf gestürzt, das machte ihn umso furchtbarer.

Diese Ansichten sollte die mediterrane Welt nie aufgeben. Das zeigt sich auch in der Benennung: Mal sprachen die antiken Autoren von »keltoi«, dann wieder von »galli«. Manche schrieben, die Kelten bewohnten den Süden und die Gallier den Norden, aber die Römer hätten Verwirrung gestiftet, indem sie alle Gallier nannten. Andere glaubten, dass sich die Gallier selbst als Kelten bezeichnet hätten. Vermutlich bestätigen diese widersprüchlichen Meinungen nur das Desinteresse an der Welt der anderen. Dass ab dem 4. Jahrhundert v. Chr.

AKG BERLIN (STERBENDER GALLIER; KAPITOLINISCHE MUSEEN ROM)

keltische Krieger als Verbündete oder als Söldner mit in die Schlacht zogen, tat dieser Einstellung zunächst keinen Abbruch.

Das sollte sich ein wenig ändern, als einige der Stämme in die Hochburgen der Mittelmeerzivilisationen einfielen. Markante Daten sind die Eroberung Roms durch den Gallier Brennus 387 v. Chr. und die Plünderung des Apolloheiligtums von Delphi 279 v. Chr. durch die Truppen seines Namensvetters. Jahrelang machten keltische Krieger hellenistischen Herrschern in Kleinasien zu schaffen. Als sich Rom im 3. Jahrhundert v. Chr. anschickte, seine Herrschaft auf ganz Italien auszudehnen, kämpften Kelten an der Seite der Samniten und Etrusker. Überdies rekrutierte Roms Erzfeind Karthago im 2. Punischen Krieg (218–201 v. Chr.) in Spanien keltische Soldaten. Diese Erfahrungen wandelten freilich das negative Bild nicht, sondern verschärften es: Aus kriegerischen Barbaren wurden nun furchtbare Feinde der Zivilisation.

Zwei griechische Autoren spielen dabei eine wesentliche Rolle: Polybios (etwa 200–120 v. Chr.) und Poseidonios (135–51 v. Chr.). Der Erste war ein Freund und Berater von Scipio Aemilianus (um 184–129 v. Chr.), dem Eroberer Makedoniens. Polybios' Hauptwerk waren die »Historien«, die den Aufstieg Roms vom Ersten Punischen Krieg bis zur Zerstörung Karthagos 146 v. Chr. schilderten. Der in Syrien geborene Poseidonios hatte Anfang des 1. Jahrhunderts v. Chr. Spanien und das südliche Gallien bereist. Sein Werk gilt als verloren, doch man weiß, dass es dasjenige von Polybios fortsetzte.

»Quell des Schreckens«

Beide berichteten zwar über die keltische Welt, doch aus der Sicht von Historikern, die den Weg des römischen Imperiums nachzeichneten. Ihr Interesse an dieser Kultur beschränkte sich also auf deren Rolle als Gegner. So schrieb Polybios: »Die Erscheinung ... der nackten Krieger, die in der vordersten Reihe aufgestellt und alle in den besten Jahren sowie von außergewöhnlich stattlichem Aussehen waren, stellte einen ... Quell des Schreckens dar.«

Andere Autoren wie Diodorus von Sizilien bezogen sich in der Mitte des 1. Jahrhunderts v. Chr. auf die Werke ihrer Kollegen und festigten so die Klischees: »Sie übergießen die Haare stets mit einer Lösung auf Kalkbasis. Sie streichen sie von der Stirn über den Scheitel zurück bis in den Nacken, sodass ihr Aussehen an einen Satyr oder Pan erinnert. Die Pflege, die sie ihren Haaren angedeihen lassen, verdickt sie derart, dass sie sich in nichts von Pferdehaar unterscheiden.« Alles in allem war der Kelte groß, doch von schlaffem Fleisch, war blond, mit struppiger Mähne und – für die mediterrane Welt ein Unding – schnurrbärtig, er handelte impulsiv, war eher Krieger als Bauer, trug zu viel Schmuck und neigte zu Alkoholexzessen – den Wein trank er pur!

Manche dieser Vorurteile beruhten auf keltischen Praktiken, die sich der griechisch-römischen Welt nicht erschlossen. So war der Wein in stark hierarchisierten Gesellschaften ein Machtinstrument und damit ein Grundbestandteil bei Riten. Ausgrabungen in jüngerer Zeit lassen vermuten, dass hinter den von »tugendhaften Zivilisierten« wie Cicero gebrandmarkten Menschenopfern Bestattungs- oder Kriegsriten standen. Praktiken, deren Bedeutung die Mittelmeervölker nicht verstanden, wurden als barbarische Verhaltensweisen interpretiert.

Beharrlich kolportierten die Historiker solche Vorstellungen, obwohl sie im ▷

▷ 1. Jahrhundert ohnehin überholt waren. Während römische Münzen dieser Zeit noch Kelten mit »barbarischer« Haartracht darstellten, zeigten gallische Münzen und Statuen Frisuren, die den Schönheitsidealen der Mittelmeerwelt entsprachen (siehe Bilder S. 54 und 55). Das Gleiche gilt für die Bewaffnung: Die Kelten wurden immer noch als Streitwagenkämpfer abgebildet, obwohl das archäologischen Befunden nach längst nicht mehr der Fall war. Diodorus schrieb dazu: »Für Reisen wie bei Gefechten benutzen sie einen von zwei Pferden gezogenen Wagen, wobei der Streitwagen von einem Wagenlenker und einem Krieger besetzt ist. Wenn sie sich berittenen Einheiten gegenüberfinden, greifen sie ihre Gegner mit dem Wurfspeer an und steigen dann vom Wagen herunter, um den Schwertkampf zu beginnen.«

Das Unwissen machte sich nicht nur Cicero zu Nutze, der seinen Prozess mit Hilfe von Verunglimpfungen des Gegners gewinnen konnte. Auch Gaius Iulius Caesar baute erfolgreich auf das alte Feindbild, als er ohne Auftrag des Senats im freien Gallien einfiel – den Zug eines helvetischen Stamms nach Westgallien bauschte er zur Bedrohung Roms auf, der er als verantwortungsvoller Feldherr zu begegnen hatte. Ohne die Kriegsbeute und seine militärischen Erfolge wäre Caesar kaum in der Lage gewesen, sich später zum Diktator aufzuschwingen.

Gallien wurde rasch romanisiert und man sollte meinen, dass damit die Vorstellung vom barbarischen Kelten keine Berechtigung mehr besaß. Ein Irrtum. Als Augustus im Jahr 27 v. Chr. die Macht übernahm und die Staatsform der Republik endgültig durch die Alleinherrschaft, den Prinzipat, ersetzte, zog er alle Register der ihm zur Verfügung stehenden Propagandamaschine, um diesen Schritt ideologisch abzusichern. Ein goldenes Zeitalter bräche an, ließ er durch den Dichter Horaz verkünden. Auf den

Asterix – ein Gallier?

Wie gut zeichnen die bekannten Comics die Vergangenheit nach?

Von Klaus-Dieter Linsmeier

Ganz Gallien ist besetzt, nur ein kleines Dorf an der Küste hört nicht auf, Caesars Legionen Widerstand zu leisten. Ein Zaubertrank ihres Druiden verleiht ihnen übermenschliche Kraft, was die Römer fernhält und ein angenehmes Leben ermöglicht: ein bisschen Herumlümmeln oder Wildschweinjagen und bei allzu großer Langeweile prügelt man sich eben untereinander. Steht dann doch einmal mehr auf dem Spiel, übernimmt eine Spezialeinheit, bestehend aus dem listigen Asterix und dem starken Obelix (das ist nicht im Sinn von dick gemeint).

So kennen und lieben Fans jenes Gallien des 1. Jahrhunderts v. Chr., wie es der Autor Albert Uderzo und der Zeichner René Goscinny entworfen haben. Auch das Bild der römischen Antike haben diese Comics mitgeprägt. Fragt sich, inwiefern es mit der historischen Wirklichkeit übereinstimmt.

Die Amsterdamer Althistoriker Sunnyva van der Vegt und René van Royen sind dem nachgegangen und haben antike Quellen wie archäologische Funde auf Hinweise befragt. Ihrem 1998 im Verlag C.H.Beck erschienenen und 2004 nachgedruckten Bestseller »Asterix – die ganze Wahrheit« folgte vor Kurzem »Asterix entdeckt die Welt«. Das Fazit: Die Comicautoren haben sich schlau gemacht, nehmen sich aber künstlerische Freiheiten.

Das beginnt natürlich schon bei der Grundidee: Über ein derart hartnäckiges Widerstandsnest an der Küste verlor Caesar in seinem Kriegsbericht kein Sterbenswörtchen. Doch falls ein solches Dorf existiert hätte, verortet es die in jeder Asterix-Ausgabe übliche Karte in der heutigen Bretagne. Nun lebten zwar viele Gallier tatsächlich in Dörfern – Caesar hatte nicht wenige davon niederbrennen lassen –, doch ausgerechnet in der fraglichen Gegend siedelten die Veneter, ein Volk von Fischern, das in Städten wohnte. Doch so genau ist die Comic-Karte nicht. Haben Uderzo und Goscinny einen anderen Stamm gemeint? Schließlich ernähren sich dessen Mitglieder nur selten von Fisch, und das nicht nur, weil der nicht immer frisch ist.

Etwas kritischer muss man wohl die dörfliche Architektur beurteilen. Die Gallier bauten ihre Häuser archäologischen Funden nach nicht aus Stein, sondern aus Holz und Flechtwerk, verputzt mit Lehm; für das Dach nahmen sie Stroh. Das heißt aber nicht, dass sie den Stein verschmähten; Caesar schwärmte von Stadtmauern, die Holz mit Stein kombinierten. Wer weiß, spekulieren die beiden Historiker schmunzelnd, ob Bewohner einer Felsküste nicht ganz pragmatisch doch verbaut hätten, was direkt vor ihrer Haustür lag?

Wie aber war es einst um die Streitlust bestellt und um den großen Mut? Antike Quellen bestätigen, dass Tapferkeit den Kelten viel galt, sie berichteten sogar von nackten Kämpfern. Zu den großen Schwächen aber zählte, dass die Kelten schlecht organisierte Einzelkämpfer waren. Auch wenn das Fans nicht gefallen wird: Ohne ihren Zaubertrank wären die sympathischen Dorfbewohner schnell der römischen Militärmaschinerie erlegen. Tatsächlich hatten es Caesars Legionen oft mit einer vielfachen Übermacht zu tun.

Übrigens: Uderzo und Goscinny ließen ihre Helden zwar im Pulk stürmen, doch immer schicklich bekleidet. Obligatorisch ist die Hose, tatsächlich einst ein typisches Kleidungsstück der Kelten, laut Caesar oft auffällig gefärbt. Gestreifte Mäntel, mit einer Spange an der Schulter befestigt, gehörten damals dazu, in den Comics kennzeichnen sie nur die besser Gestellten. Umgekehrt zieren Asterix und Co. mächtige Schnurrbärte, dem griechischen Autor Poseidonios zufolge eine Haartracht der Vornehmen. Gänzlich fehlt den Comicgalliern der so genannte Torque, ein für die Kelten typischer Halsring.

Das wohlbekannte Dorf wird von einem gewählten Häuptling geleitet und der wiederum von seiner Frau. Mit den gallischen Frauen war wohl wirklich nicht gut Kirschen essen: Ammianus Marcellinus warnte im 4. Jahrhundert n. Chr. davor, mit einem Kelten Streit anzufangen, wenn dessen Frau zugegen war. Sie war ein ernst zu nehmender Gegner. Übrigens: Es war in einigen Stämmen wohl üblich, den Anführer zu wählen, es gab aber auch erbliche Titel und allerlei Mischformen.

Auch der Druide und der Barde werden im Comic bei schwierigen Fragen gehört, und das ist realistisch: Sie vermochten sogar Kriege zu beenden, indem sie sich einfach zwischen die verfeinde-

Bürgerkrieg, der nach Caesars Ermordung (44 v. Chr.) ausgebrochen war, sollte endlich wieder Frieden folgen. Rom würde die Welt beherrschen und alte Werte wieder Gültigkeit haben. Diese Botschaften verbreiteten Schriftsteller, aber auch der Wandschmuck öffentlicher Gebäude oder das Massenmedium der Antike, die Münzen. Einfache Symbole waren vonnöten und die Kelten mussten noch einmal als Feindbild herhalten, als Inbegriff der Schrecken der Epoche vor Augustus.

Erst als Rom in der Varusschlacht 9 n. Chr. eine herbe Niederlage erlitt, die mögliche Expansionspläne in Richtung Germanien beendete, erfuhr das Bild vom Barbaren eine leichte Modifikation: Der Limes kennzeichnete bald die Grenze zwischen der zivilisierten und der barbarischen Welt. Der Geograf Strabon (63 v. – 23 n. Chr.) wiederholte zwar die alten Stereotypen, doch mit Einschränkungen: »In seiner Gesamtheit ist der Stamm, den man heute entweder gallisch oder galatisch nennt, zugleich begeistert für den Krieg, impulsiv und schnell dabei, die Waffen zu ergreifen, andererseits jedoch frei von List und bösen Absichten. ... Zwar leben heute alle in Frieden, unterworfen und ... den Anordnungen ihrer Bezwinger, der Römer, folgend. Doch die alten Zeiten sowie die Sitten, die heute noch bei den Germanen bestehen, haben unsere Beschreibung inspiriert. In der Tat ähneln die Germanen den Galliern sowohl im Aussehen als auch in den Institutionen, und die einen sind mit den anderen verwandt.« Und so dienten fortan die Germanen als Feindbild. Doch wie schrieb Strabon: Waren nicht manche auch Kelten? ◁

Patrick Thollard lehrt Archäologie an der Universität Montpellier. Der Beitrag basiert auf »Le Celte, éternel ennemi», Pour La Science 7/2006, S. 44.

AUTOR

© 2007 LES EDITIONS ALBERT RENÉ / GOSCINNY & UDERZO / INTERFOTO (AUS: ASTERIX UND DER KUPFERKESSEL, BD. 13)

Zwar lebten viele Gallier in kleinen Dörfern, doch kaum in Steinhäusern. In der Schmiedekunst brachten sie es zur Meisterschaft, aber Hinkelsteinfabrikanten gab es nicht.

ten Heere stellten (wobei wohl nur selten die stimmliche Qualität eines Troubadix eine Rolle gespielt haben dürfte). Allerdings hatten einige Stammesführer wohl selbst die Funktion des Priesters inne.

Alles in allem: Viele Details sind stimmig umgesetzt. Damit ist es Zeit für das große Festbankett, die Versammlung an der runden Tafel um den Wildschweingrill. Poseidonios zufolge hockten die Kelten wirklich gern auch mal im Kreis um das Feuer herum oder zumindest nahe der Herdstelle. Allerdings wurde darauf wohl nur selten Wildschwein gegrillt. Man pflegte Fleisch eher zu kochen – für Obelix sicher eine nicht artgerechte Grausamkeit gegenüber dem armen Tier. Zudem kam wohl häufig ein Hausschwein auf den Tisch, die Landwirtschaft Galliens war weit entwickelt. Die wilden Verwandten dieses Tiers hatten gleichwohl große Bedeutung, denn sie finden sich immer wieder in der keltischen Kunst.

Vermutlich galt das Wildschwein als Symbol für Mut und Kraft. Der Verdacht liegt nahe, dass es genau deshalb zur Lieblingsspeise der unbesiegbaren Gallier geworden ist, die sich seit 1959 Band für Band auf charmante Weise für die verlorene Schlacht von Alesia rächen.

Klaus-Dieter Linsmeier ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft« und »Abenteuer Archäologie«.

Die Mär vom heiligen Hain

Neodruiden, Vorsicht: Dieser Beitrag gefährdet Ihre Weltsicht!

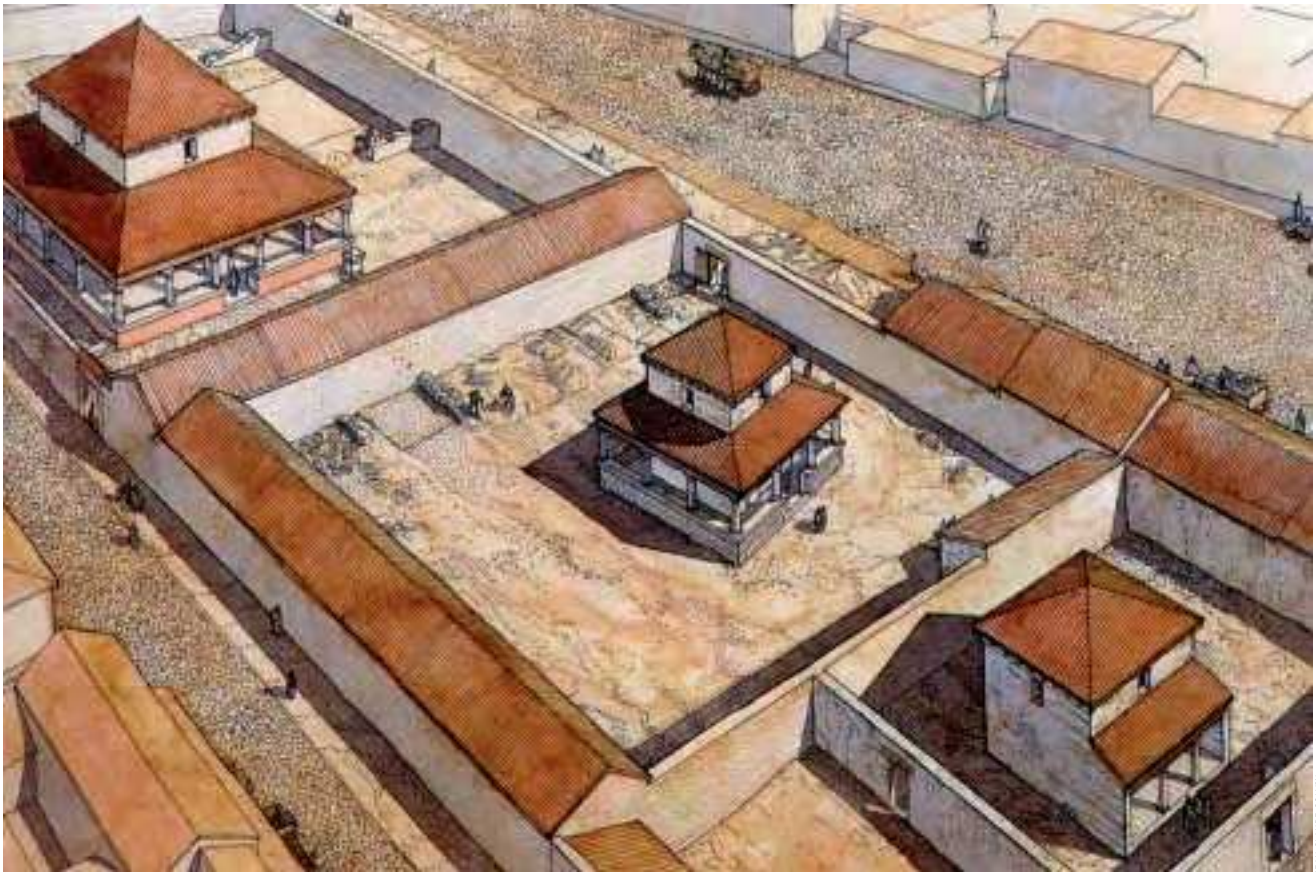
Von Christian Goudineau

Das Druidentum floriert, es hat den Untergang Galliens anscheinend gut überstanden. Da lädt der Orden der Druiden von Avalon (AVO) seine Brüder und Schwestern ans Herdfeuer, um sie in mystische Geheimnisse einzuweihen. Der Deutsche Druiden-Orden hingegen setzt sich humanitäre Ziele. Meist esoterisch, mitunter sektiererisch präsentieren sich Neodruiden in bunter Vielfalt. Ihnen gemeinsam ist der Glaube an eine gallische beziehungsweise keltische Naturreligion. Zweifellos übt eine solche Vorstellung in unserer durch Hektik und Entfremdung geprägten Welt eine große Faszination aus. Leider hat sie mit der geschichtlichen Wirklichkeit nur wenig gemein.

Doch solche Fehlurteile fällten in der Antike schon Griechen und Römer (siehe den vorigen Beitrag), die Rezeption ihrer Schriften prägte die Vorurteile der Neuzeit. Kein Wunder also, dass die französischen Aufklärer Denis Diderot (1713–1784) und Jean-Baptiste le Rond d'Allembert (1717–1783) in ihrer »Enzyklopädie« schrieben: »Die Sitten der Gallier zu Caesars Zeiten waren die reinste Barbarei; sie leisteten ein Gelübde, dass sie, wenn sie einer gefährlichen Krankheit, einer hohen Gefahr, einer ungewissen Schlacht entkämen, ihren Schutzgottheiten menschliche Opfer darbringen würden; überzeugt davon, dass man von den Göttern das Leben eines Menschen nur durch den Tod eines anderen erlangen könne. Sie hatten öffentliche Opfer dieser Art, bei denen die Druiden, die die Nation regierten, die Priester waren. Diese Opferpriester verbrannten Menschen in extra angefertigten, großen und scheußlichen Statuen aus Weidenruten. Die Druidinnen versenkten Messer ins Herz der Gefangenen und beurteilten die Zukunft anhand der Art, wie das Blut lief: große, etwas ausgehöhlte Steine, die man an den Grenzen Germaniens und Galliens gefunden hat, sind angeblich die Altäre, auf denen man diese Opfer vollzog. Wenn dem so ist, dann sind das alle Denkmäler, die uns von den Galliern bleiben. Man muss, wie Monsieur de Voltaire sagt, die Augen von diesen schrecklichen Zeiten abwenden, die der Natur zur Schande gereichen.«

Grausam und unzivilisiert waren sie also, doch immerhin schrieben die Gelehrten des 18. Jahrhunderts den Galliern die Urheberschaft für die beeindruckenden Megalithbauten in England und Frankreich zu. Diese Vorstellung hält sich hartnäckig, auch heute noch ist es den Mitgliedern der britischen Druid Society erlaubt, im Steinkreis von Stonehenge zum Beispiel Sonnenwendfeiern abzuhalten.

Die Schriftsteller James MacPherson (1736–1796) und François-René Chateaubriand (1768–1848) trugen viel dazu bei, die keltische Vergangenheit zu verklären, ihre Romanfiguren – der Kriegerbarde Ossian beziehungsweise die Druidin Velléda – verzauberten Europa. Aus den grausamen Barbaren wurden nun edle Wilde, die vielleicht ein wenig naiv, doch mutig und naturverbunden waren. So war im französischen Schulbuch »Petit Lavisse« noch Ende des 19. Jahrhunderts zu ihrer Religion zu lesen: »Die Gallier ... hatten nur sehr unvollkommene Begriffe über die Göttlichkeit. ... Sie machten alles, was ihnen groß, überraschend oder bewundernswert erschien, zum Gott. Sie glaubten an einen



JEAN-CLAUDE GOLVIN

Das Heiligtum von Argentomagus (im Département Indre) bestand aus einem kleinen Tempel (rechts unten) und zwei »fana« (in der Mitte und links oben). Diese Tempel mit einem erhöhten zentralen Dach und einer umlaufenden Galerie waren eine Schöpfung gallorömischer Architektur. Sie ersetzten keltische Heiligtümer mit einem einfachen Altar in der Mitte eines eingezäunten Platzes.

Gott des Donners, an einen Gott der Berge, an einen Gott der Wälder, an Götter des Kriegs, des Handels und der Künste, der Poesie und der Redekunst. Ihre Priester, die man Druiden nannte, waren sehr mächtig und sehr respektiert. Sie lehrten, dass die Seele nach dem Tod in einen anderen Körper übergeht; dieser Glaube rief bei den Galliern eine große Verachtung vor dem Tod hervor und erhöhte ihren natürlichen Mut. ... Es haben sich in unserem Land, vor allem in den Départements des Westens und des Zentrums, Denkmäler aus der Zeit der Gallier erhalten. Es handelt sich um Steine, die bald in die Erde gesteckt und in langen Alleen aufgereiht sind, bald in Kreisen angeordnet oder übereinander gelegt sind, dass sie eine Art Tisch bilden.«

Doch den Makel der Menschenopfer waren sie nicht losgeworden, denn das Schulbuch bemerkte auch: »Aber ihre Religion war grausam, und sie opferten Menschen. Wenn ein Häuptling starb, verbrannte man mit ihm alles, was ihm lieb war, und sogar seine Sklaven.«

Der »Petit Lavisse« war nicht auf dem aktuellen Stand, denn Forscher zeigten ab den 1860er Jahren, dass die Megalithbauten einer älteren Kultur als der keltischen entstammten. Diese Erkenntnis aber förderte die Vorstellung von der Naturreligion sogar noch: Statt Steinkreise zu errichten, ließ man die Gallier nun im Gebirge, an Quellen und in heiligen Hainen zu ihren Göttern beten. In der Natur hätten ihre Priester, die Druiden, auch die Requisiten zu ihren magischen Praktiken gefunden. Schrieb nicht Plinius der Ältere (etwa 23–79 n. Chr.), dass sie »am sechsten Tag des Mondes« Misteln sammelten?

Nischen für Schädel und Waffen

Eine solche Religion wäre nach heutiger Kenntnis für die Antike und für ein indoeuropäisches Volk aber ganz untypisch gewesen. Und tatsächlich stimmen derartige Klischees nicht, wie Archäologen inzwischen wissen.

Vor knapp dreißig Jahren wurden in Gournay-sur-Aronde nördlich von Paris Kultplätze ausgegraben, die als die »belgischen Heiligtümer« bekannt sind, da sie im ehemaligen Stammesgebiet der Belger liegen. Ihre Heiligtümer hatten aber offenbar wenig von einem lichten Eichenhain: Ein Platz wurde durch eine Mauer – allerdings aus Holz und Lehm – sowie durch Gräben abgegrenzt. Dass er tatsächlich religiösen Zwecken diente, verraten Eingangsportale und Altäre, aber auch Tausende von Tierknochen – Überreste ritueller Opferungen. Auch die Zurschaustellung von Menschenschädeln, Waffen und Wagenrädern in speziellen Nischen bezeugt die religiöse Funktion der belgischen Heiligtümer – den besiegten Feinden abgenommene Waffen wurden auch in Griechenland und Italien den Gottheiten als Weihegeschenk dargebracht.

Im Lauf der Jahre entdeckten Archäologen weitere solche Stätten. Die Anlage ▷

von Ribemont-sur-Ancre (westlich von Amiens) pries offenbar einen militärischen Sieg: Mehr als hundert vermutlich im Kampf gefallene Feinde wurden geköpft und ihre Körper an Pfähle gebunden. Dort blieben sie sichtbar für alle, bis die Leichname durch Verwesung von selbst abfielen (siehe Bild unten). In dem nördlich von Rouen gelegenen Fesque fanden die Forscher entlang der Einfriedung kleine Gruben, in denen Reste von Beinpaaren steckten. Vermutlich wurden auch dort feindliche Krieger, vielleicht aber auch zum Tode Verurteilte an Pfählen angebunden und zum Teil auch eingegraben.

In Acy-Romance in den Ardennen kam ein 15 Hektar großes gallisches Dorf vollständig zu Tage. Es umfasste Kultbereiche und Tempel, auch dort fand man menschliche Überreste in einer Reihe kleiner Gruben. Ein angrenzender Platz von 3500 Quadratmetern, begrenzt durch eine Einfriedung, hatte vermutlich keinen religiösen Zweck, sondern diente der Machtinszenierung: Die keltische Elite bewirtete dort ihre Mitbürger.

Solche Befunde passen nicht zum Bild der Druiden, die in heiligen Hainen Naturgottheiten huldigen. Die Gallier praktizierten ihre Kulte auch in eigens gebauten Anlagen, und diese hatten mitunter zudem profane Aspekte. So verfügte eine Anlage im zentralen Oppidum der Treverer auf dem luxemburgischen Titelberg über ein System von Gängen, das an die »saepta« erinnert, den für die Volksabstimmungen nach Hundertschaften durch Abgrenzungen gegliederten Platz auf dem Marsfeld in Rom. Drückte sich darin ein römischer Einfluss aus?

Dergleichen entdecken Forscher freilich nicht nur in Nordgallien. Im Herzen der Auvergne liegt die Stätte von Corent, dem Hauptort der Arverner vor dem Gallischen Krieg. Im Zentrum des Oppidums entdeckten die Forscher ein durch hohe Mauern abgeschlossenes Ensemble von Kultgebäuden und offenen Plätzen. Tonnen von Tierknochen, Tausende von Amphoren und anderes mehr legen den Schluss nahe, dass dort Opfermahle, vermutlich auch Bankette abgehalten wurden – zahlreiche Amphoren waren wohl mit dem Schwert geköpft worden, denn die Korken steckten noch in ihren Hälsen. Es ging mitunter offenbar recht unheilig zu. Schmelztiegel, Münzstempel, Waagen und Münzen aus Bronze, Silber oder Elektrum – ein Gemisch aus Gold und Silber – zeigen überdies, dass das Münzwesen ebenfalls eine Aufgabe dieses Bezirks war. Zum Fundgut gehörte eine Art Jetons, manchmal schlicht aus Keramikscherben ausgeschnittene Scheiben. Hier kann man nur vermuten: Waren dies von einflussreichen Personen ausgegebene »Eintrittskarten« für politische Versammlungen oder Festgelage?

Wie vielfältig die keltische Religion war, zeigt auch eine überraschende Beobachtung in den südlichen Regionen, die ab 121 v. Chr. die Provinz Gallia Narbonensis bilden sollten. Dort gruben Archäologen Heroenstatuen aus, die zum Teil Jahrhunderte älter waren als die Bauwerke, in denen sie entdeckt wurden. Nun sind Heroen ein häufiges Thema in der Mythologie indoeuropäischer Völker. Eine naheliegende Erklärung ist, dass manche Kultplätze wieder aufgegeben und die Kriegerbilder dann andernorts erneut aufgestellt wurden – so wie romanische Marienfiguren in Kirchen des 18. Jahrhunderts zu sehen sind.

Alles in allem unterschieden sich die Kulte einiger gallischer Stämme offenbar in den Grundzügen nicht von denen anderer antiker Völker. Sie opferten den Göttern in abgegrenzten Heiligtümern, manche Zeremonien wurden gemeinschaftlich begangen. Wie in der griechisch-römischen Welt war die Religion ein gut organisierter Teil des Lebens.

Und die Götter, mag ein Neodruide kritisch fragen? Sollten sich in solchen institutionalisierten Einrichtungen nicht Abbilder von ihnen finden wie bei Griechen und Römern? In der Tat scheinen die Objekte der Verehrung seltsamerweise abwesend zu sein. Kandidaten gibt es zwar – große hölzerne Statuen, die wahrscheinlich mit Kleidung, Schmuck und Waffen ausgestattet waren –, sie kamen aber erst kurz vor der römischen Eroberung in Gallien auf. Doch erinnern wir uns daran, dass der gallische Häuptling Brennus, als er 291 v. Chr. das Heiligtum von Delphi betrat, der Überlieferung nach in Lachen ausbrach, so absurd fand er die Darstellung von Göttern! Diese Einstellung mag wirklich eine gallische Eigenart gewesen sein.

Ein Opferplatz der besonderen Art kam bei Ribemont-sur-Ancre zum Vorschein. Vermutlich waren dort enthauptete Feinde aufrecht und mit ihren Waffen an einem Holzgestell festgebunden worden.

JEAN-LOUIS BRUNAUX

Der silberne Kessel von Gundestrup gibt viele Rätsel auf, der Autor postuliert nun eine astrologische Bedeutung. Demnach stelle der Stier auf der Bodenplatte das auch heute gleichnamige Sternbild dar, die von einem Hund begleitete Kriegerfigur darüber den Orion. Diese Darstellung erinnert an den so genannten Atlas von Farnese (rechts), einen Titanen, der eine Himmelskugel trägt.

AKG BERLIN (GUNDESTRUPKESSEL, DETAIL BODEN INNEN, 1. JH. V. CHR.; NATIONALMUSEUM KOPENHAGEN)

GRIFFITH OBSERVATORY, LOS ANGELES

Vor dem Hintergrund der neuen Perspektive lässt sich manche Hinterlassenschaft gallischer Religion neu interpretieren. Dazu gehört meines Erachtens auch der berühmte Gundestrup-Kessel (Bild oben links). Die Silberplatten, aus denen er besteht, wurden 1891 in einem Moor im dänischen Himmerland gefunden. Die offenkundig kultische Schale durchmaß einst knapp siebzig Zentimeter und wog mehr als neun Kilogramm. Aus dem Silber hatten Handwerker zahlreiche Bilder getrieben, menschliche Gestalten, Mischwesen und wilde Tiere.

Ist der Gundestrup-Kessel ein Himmelsatlas?

Der Stil dieser Verzierungen verweist auf das Ende des 2. oder die erste Hälfte des 1. Jahrhunderts v. Chr. und auf den thrakischen Kulturkreis im heutigen Bulgarien. Aber viele Motive kennen die Forscher auch aus dem Repertoire gallischer Künstler. Also eine Auftragsarbeit thrakischer Handwerker, bestellt von Galliern? Doch wie gelangte sie nach Dänemark? Fragen, die vermutlich für immer ohne Antworten bleiben werden.

Auch die Bedeutung der dargestellten Figuren ist keineswegs geklärt. Einige Wissenschaftler haben versucht, aus den Bildern des Kessels eine keltische Mythologie zu rekonstruieren. So entdeckte der britische Archäologe Tymothy Taylor von der Universität Bradford einen nordindischen Einfluss auf die Bildthemen (Taylor propagiert einen starken Einfluss sozialer Phänomene wie der Religion auf die Verbreitung der Metallurgie in vorgeschichtlicher Zeit; Anm. d. Red.). Hingegen las der Straßburger Archäologe Jean-Jacques Hatt (1913–1997) aus den Kesselbildern Mythen von einer Muttergöttin und ihren Ehemännern, dem Himmels- und dem Erdgott, die einander bekämpften. Alle Interpretationen müssen sich dem gleichen Einwand stellen: Die Kesselbilder bieten kaum Handlungen und können deshalb keine Erzählung illustrieren.

Eingedenk des neuen Wissens über die gallische Religion lohnt es sich in diesem Zusammenhang, Caesars Berichte noch einmal zu lesen: »Die Druiden sprechen gelehrt über die Gestirne und ihre Bewegungen, über die Größe der Welt und der Erde, über die Natur der Dinge, über die Macht der unsterblichen Götter.« Setzt der Kessel vielleicht Sternkonstellationen in Szene?

Vielleicht ist dies eine gewagte Hypothese, doch es gibt meines Erachtens dafür einige Indizien. Den Boden des Kessels ziert ein großer, liegender Stier, dessen Stirn eine Rosette schmückt. Zwei Löcher nahmen einst die Hörner auf, die leider nicht erhalten sind. Das Tier liegt auf einer Streu aus Efeublättern und Blüten. Über ihm verharrt ein Mann mit Pferdeschwanz in einer an Tanz oder Kampf erinnernden Haltung, er ist mit einem Schwert bewaffnet. Vor ihm läuft ein Hund mit aufgestelltem Schwanz. Gegenüber, unter den Hinterhufen des Stiers, scheint ein Bär oder eine Bärin zur Kugel zusammengerollt. Zu seiner oder ihrer Linken trennt eine Eidechse oder ein kleiner Drache die Efeublätter von den Blüten.

Der Stier, heute eines der Tierkreiszeichen, tauchte in der Antike in zahlreichen Mythen auf, ebenso wie Bären und Drachen (ein Drache bewachte die goldenen Äpfel im Garten der Hesperiden). Der in Alexandria geborene Mathematiker und Astronom Ptolemäus (um 100–175 n. Chr.) listete diese Tiere als Sternbilder ebenso auf wie den Hund. Wie bei den Bären gebe es einen großen und einen kleinen am Himmel, nach der griechischen Mythologie begleiteten sie den riesenhaften Jäger Orion. In der Anlage ihrer Tempel übernahmen die gallischen Stämme manche Anregung von Griechen und Römern – warum nicht auch in der Mythologie?

Ich glaube, dass die »Himmelskarte« des Gundstrup-Kessels eine Sicht auf den Kosmos repräsentiert, in dem die Erde als Scheibe galt. Die Streu aus Efeu und anderem mag die Milchstraße verkörpern. Eine genauere Datierung ermöglicht die Haltung des Stiers, der wie tot daliegt. Denn um 2200 v. Chr. verschoben sich die Sternkonstellationen aus Sicht der damaligen Astronomen, und das Zeitalter des Widders löste das des Stiers ab. In den Kulturen des Mittleren Ostens hielten die Gelehrten diesen Wandel für existenziell, vielleicht teilten die gallischen Druiden diese Meinung.

Doch einerlei, ob sich meine Hypothese bewahrheiten wird oder nicht: Wichtig ist, dass man heute derlei formulieren kann! Innerhalb von dreißig Jahren hat sich die gallische Religion von ihrem Image als Naturmystik gelöst und steht auf eine Ebener mit anderen Religionen der Antike. ◁

AUTOR

Christian Goudineau lehrt Archäologie am Collège de France in Paris. Dieser Beitrag basiert auf dem Artikel »La religion gauloise revisitée« des Autors, erschienen in Pour La Science 7/2006, S. 39.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Methan, Pflanzen und Klimawandel

KENN BROWN

Kürzlich zeigten die Autoren, dass Pflanzen Methan produzieren und ausstoßen. Dadurch ergeben sich gravierende Änderungen an der globalen Emissionsbilanz dieses Treibhausgases. Zum momentanen Klimawandel tragen Pflanzen aber nicht bei.

Von Frank Keppler
und Thomas Röckmann

Was macht man als Wissenschaftler, wenn man etwas entdeckt, das dem Lehrbuchwissen fundamental widerspricht? Wir beide sahen uns vor zwei Jahren diesem Problem gegenüber, als unsere Experimente zeigten, dass die irdische Vegetation Methan produziert. Nach gültiger Lehrmeinung sollten nur anaerobe Mikroorganismen – also solche, die in Abwesenheit von Sauerstoff gedeihen – dieses Gas herstellen können. Aber unsere Versuche ergaben zu unserem eigenen Erstaunen, dass auch Pflanzen Methan erzeugen – und sogar eine ganze Menge davon.

Am Anfang standen wir unseren Ergebnissen eher kritisch gegenüber. Wir suchten intensiv nach Fehlerquellen bei den Experimenten und verwendeten Apparaturen sowie nach gedanklichen Fehlschlüssen, denen wir womöglich aufgesessen waren. Nachdem wir uns jedoch vergewissert hatten, das unsere Resultate stimmten, wurde uns klar, dass wir auf eine Sache von großer Bedeutung gestoßen waren. Aber wie sollten wir unsere Kollegen und die Öffentlichkeit davon überzeugen? Sorgen machte uns vor allem zu erklären, wie all die fähigen Forscher, die schon seit Jahrzehnten Methan untersuchen und sich Gedanken über den Klimawandel machen, eine so bedeutende Quelle des Gases übersehen haben konnten.

Die meisten Menschen kennen Methan, chemische Formel CH_4, als Hauptbestandteil des Erdgases. Als solcher ist es zu einer bedeutenden Energiequelle geworden und wird das angesichts der begrenzten Ölvorräte auf unserem Planeten wohl auch noch längere Zeit bleiben. Methan stellt aber auch einen wichtigen Spurenstoff in der Luft dar. Etwa 600 Millionen Tonnen des Gases – sowohl aus menschlicher Aktivität (anthropogen) als auch natürlichen Ursprungs – steigen jedes Jahr in die Atmosphäre auf.

Die meisten dieser Emissionen schrieb man bisher der Zersetzung organischen Materials durch anaerobe Mikroben zu. Feuchtgebiete wie Sümpfe, Marschland und Reisfelder stellen den größten Anteil. Auch Rinder, Schafe und Termiten produzieren Methan als Nebenprodukt der anaeroben Verdauung in ihrem Magendarmtrakt. Außerdem entsteht das Gas bei Wald- und Steppenbränden sowie bei der Nutzung fossiler Energieträger (siehe Kasten auf S. 71). Mit den Jahren haben Wissenschaftler ein beträchtliches Konvolut an Fakten über den globalen Methankreislauf gesammelt, und der UN-Klimarat (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) erklärte in seinem Bericht von 2001 die wichtigsten Methanquellen für wahrscheinlich identifiziert, auch wenn der genaue Anteil jeder einzelnen unklar sei.

Trotzdem waren einige Beobachtungen nur schwer zu erklären. Ein Rätsel blieben zum Beispiel starke Variationen im Methangehalt der Atmosphäre zwischen Eis- und Warmzeiten, die sich aus der Analyse in Eisbohrkernen eingeschlossener Luftblasen rekonstruieren lassen.

Methan ist ein äußerst wirksames Treibhausgas. Deshalb ist es so wichtig, seine Quellen und die von ihnen ausgestoßenen Gasmengen zu kennen. Zwar liegen die Kohlendioxidemissionen viel höher, aber ein Kilogramm Methan erwärmt die Erde 23-mal so stark wie die gleiche Menge Kohlendioxid. Durch menschliche Aktivitäten hat sich die Methan-Konzentration über die letzten 150 Jahre fast verdreifacht. Wird sie in diesem Jahrhundert weiter ansteigen? Lassen sich die Emissionen drosseln? Klimawissenschaftler müssen solche Fragen beantworten, und das geht nicht ohne genaue Informationen über den Ursprung und das weitere Schicksal des problematischen Gases.

Frappierende Befunde

Die Idee, Pflanzen auf ihren Methanausstoß zu prüfen, entsprang unseren Untersuchungen über das eng verwandte Chlormethan (CH_3Cl), in dem eines der vier Wasserstoffatome durch Chlor ersetzt ist. Als Hauptquellen dieses Gases, das zur natürlichen Zerstörung der Ozonschicht beiträgt, galten bis vor Kurzem Ozeane und Waldbrände. Doch einer von uns (Keppler) entdeckte als Marie-Curie-Forschungsstipendiat an der Queens University in Belfast (Nordirland) vor ein paar Jahren, dass der größte Teil des Chlormethans in der Atmosphäre von alternden Pflanzen stammt. Weil Methan ebenso wie Chlormethan beim Verbrennen von Biomasse freigesetzt wird, erhob sich die Frage, ob es vielleicht gleichfalls aus Pflanzen entweicht.

Um Klarheit zu gewinnen, sammelten wir, als wir später gemeinsam am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg forschten, ungefähr dreißig verschiedene Arten von Blättern und Gräsern aus tropischen und gemäßigten Regionen und untersuchten sie in kleinen Kammern mit typischen Konzentrationen an Luftsauerstoff. Wie groß war unser Erstaunen, als all diese Pflanzenreste Methan produzierten! Wie die Messungen ergaben, setzt ein Gramm einer getrockneten Pflanze in der Stunde üblicherweise zwischen 0,2 und drei Nanogramm (milliardstel Gramm) des Gases ▷

Nach neuesten Erkenntnissen emittieren Bäume das Treibhausgas Methan und tragen damit schon seit Hunderten von Millionen Jahren mit dazu bei, dass die Erde nicht zufriert.

▷ frei. Selbst mit unseren hochmodernen Apparaturen waren diese winzigen Mengen allerdings nur sehr schwer zu messen.

Noch komplizierter wurde die Aufgabe deshalb, weil auch normale Umgebungsluft bereits Spuren an Methan enthält. Das ist unserer Meinung nach der Grund, warum Biologen das Phänomen nicht schon früher beobachtet haben. Der Schlüssel zu unserer Entdeckung liegt darin, dass wir, um das störende Methan aus der Umgebung auszuschalten, vor jedem Experiment die Kammer mit methanfreier Luft durchspülten. Alles Methan, das wir maßen, konnte deshalb nur vom Pflanzengewebe stammen.

Nachdem die Messungen an getrockneten Blättern und Gräsern ein positives Ergebnis gebracht hatten, unternahmen wir ähnliche Untersuchungen an lebenden Pflanzen (Kasten auf S. 72). Dabei fanden wir Emissionswerte, die das Zehn- bis Hundertfache der Werte von abgestorbenem Pflanzengewebe erreichten. Mit einer Reihe von Experimenten konnten wir ausschließen, dass anaerobe Bakterien im Boden das Methan produzierten. Schließlich bestand für uns nicht mehr der geringste Zweifel: Auch lebende Pflanzen setzen bedeutende Mengen des Gases frei.

Die Frage, wie sie das tun, konnten wir nicht sofort beantworten, obwohl wir den Verdacht hatten, das zuckerartige Pektin spiele in den Zellwänden eine Rolle; denn auch reines Pektin gibt, wie wir feststellten, unter Umgebungsbedingungen Spuren von Methan ab. Unsere Vermutung ist, dass Pflanzen das Gas bei häufig vorkommendem Stress wie hohen Temperaturen oder intensiver Sonneneinstrahlung verstärkt freisetzen. Dabei könnten bestimmte Teile von Pektin – vor allem Methoxyl-Gruppen – in Methan umgewandelt werden.

Um diese Hypothese zu prüfen, führen wir derzeit Untersuchungen mit Pektinen durch, in denen an definierten Stellen der normalerweise vorhandene leichte Wasserstoff gegen Deuterium ausgetauscht ist. Taucht dieser isotopische Fingerabdruck im freigesetzten Methan auf, erlaubt das Rückschlüsse auf die Molekülgruppe, aus der es stammt.

Tropische Methanwolken

Damals beschlossen wir jedoch, nicht zu warten, bis der Mechanismus geklärt wäre. Angesichts der Rolle von Methan beim Klimawandel schien es uns wichtiger, uns Gedanken über den Beitrag dieser neuen Quelle zur globalen Bilanz des potenten Treibhausgases zu machen.

Wie hoch läge wohl die Emission durch die gesamte Vegetation auf der Welt? Von Anfang an war uns klar, dass die minimalen Methanmengen, die ein einzelnes Blatt oder eine Pflanze produziert, sich schnell zu großen Beträgen addieren würden. Immerhin ist ein beträchtlicher Teil des Globus von Vegetation bedeckt. Trotzdem waren wir von der Zahl überrascht, die unsere ersten Hochrechnungen lieferten: Zwischen 60 und 240 Millionen Tonnen Methan geben Pflanzen Jahr für Jahr insgesamt ab – das sind zehn bis vierzig Prozent der globalen Emissionen. Der größte Teil davon, etwa zwei Drittel, stammt aus den dicht bewachsenen Tropen.

Wir wussten natürlich, dass die Extrapolation von einer begrenzten Menge Laborproben auf globale Verhältnisse durchaus gewagt ist. Doch zum Glück erhielten wir Rückendeckung von ganz unerwarteter Seite. Ein Team von Umweltphysikern in Heidelberg beobachtete mit dem Satelliten Envisat die Erdatmosphäre vom Weltall aus. Im März 2005 meldete es die Entdeckung von Methan-»Wolken« über tropischen Wäldern, die nicht mit dem derzeitigen Verständnis des globalen Methanhaushalts erklärbar seien. Zu unseren Befunden passten sie jedoch hervorragend: Quelle der erhöhten Methanwerte über den Wäldern war demnach die Vegetation.

Weiteren Rückhalt verschafften uns kürzlich Paul J. Crutzen, Chemie-Nobelpreisträger von 1995, und seine Kollegen. Nach der Publikation unserer Ergebnisse im Januar 2006 unterzogen sie Messungen, die sie 1988 an Luftproben aus der Savanne Venezuelas vorgenommen hatten, einer neuerlichen Analyse und kamen zu dem Schluss, dass die dortige Vegetation vermutlich 30 bis 60 Millionen Tonnen Methan freisetzt. »Wenn ich auf 1988 zurückblicke«, resümiert Crutzen, »hätten wir diese Entdeckung damals auch schon machen können. Aber gefangen in der Lehrmeinung, Methan könne nur unter anaeroben Bedingungen entstehen, verpassten wir die Chance.«

Obwohl die Satellitendaten und Crutzens Befunde unsere Ergebnisse stützen, betrachten viele Wissenschaftler die Methanemission von Pflanzen immer noch mit großer Skepsis. Vor allem ziehen sie unsere Schätzungen der insgesamt freigesetzten Menge in Zweifel. Aus diesem Grund haben etliche Kollegen, das Ausmaß des weltweiten Methanausstoßes von Pflanzen mit anderen als den von uns verwendeten Methoden, aber unter Rückgriff auf unsere Emissionsraten neu berechnet. Nach ihren Ergebnissen liegt die pro Jahr von der irdischen Vegetation abgegebene Methanmenge zwischen 20 und 120 Millionen Tonnen, was ungefähr der Hälfte unserer ersten Hochrechnungen entspricht.

Im Übrigen würden unsere Ergebnisse auch ein altes Rätsel lösen: die Frage, warum der Methangehalt der Luft in der Vergangenheit parallel zu den globalen Mitteltemperaturen geschwankt hat. Festgestellt wurde das anhand von Eisbohrkernen. Diese enthalten sowohl Informationen über die Zusammensetzung der Atmosphäre als auch über Klimaänderungen während der Zeitspanne seit

In Kürze

▶ Nach bisheriger Lehrmeinung wird das als Hauptbestandteil von Erdgas bekannte Methan nur von Mikroben produziert, die in Abwesenheit von Sauerstoff gedeihen. Von den Autoren und ihren Mitarbeitern durchgeführte Experimente zeigen jedoch, dass auch Pflanzen **das hochwirksame Treibhausgas** erzeugen.

▶ Obwohl diese erstaunliche Entdeckung einige bislang rätselhafte Beobachtungen erklären kann, sind etliche Wissenschaftler noch skeptisch, besonders was die Menge des von der Vegetation insgesamt erzeugten Methans angeht. Die Kenntnis der Methanquellen und ihres jeweiligen Ausstoßes ist wichtig für **Computersimulationen** der Klimaentwicklung.

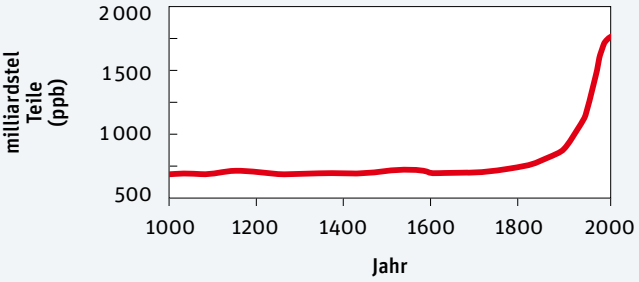
▶ Entgegen einer frühen Fehlinterpretation der Befunde tragen Wälder aber weder zum momentanen **Anstieg der Methan-Konzentration** in der Atmosphäre noch zur derzeit beobachtbaren globalen Erwärmung bei.

Was in den Lehrbüchern steht

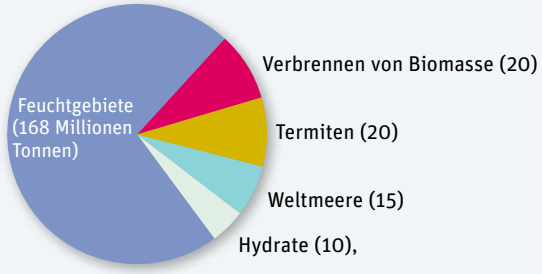
In den letzten 150 Jahren hat sich der Methanausstoß in die Erdatmosphäre in etwa verdreifacht – auf heute ungefähr 600 Millionen Tonnen jährlich. Darin liegt ein Problem; denn Methan ist ein Treibhausgas, das noch viel stärker als Kohlendioxid Wärme in der Erdatmosphäre zurückhält und so zur Aufheizung des Globus beiträgt.

Nach herkömmlichem Verständnis stammt die gesamte natürliche Methanemission von Mikroorganismen, die an feuchten, sauerstoffarmen Orten gedeihen. Zu diesen gehören Sümpfe und Reisfelder sowie der Verdauungstrakt von Termiten und Wiederkäuern. Methan kommt aber auch in fossilen Brennstofflagerstätten vor und bildet den Hauptbestandteil von Erdgas. Analysen seiner Quellen in der Umwelt (Tortendiagramme) zeigten, dass der dramatische Anstieg der Methan-Konzentration seit Mitte des 19. Jahrhunderts auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist – vor allem auf die Nutzung fossiler Brennstoffe für die Energieerzeugung und die Intensivierung des Reisanbaus und der Viehwirtschaft wegen des Bevölkerungswachstums. Durch die Ergebnisse der Autoren ändert sich nichts an der Erklärung, warum die Methan-Konzentration in der Atmosphäre gestiegen ist (Kurve), aber die relativen Beiträge der verschiedenen natürlichen Quellen zur Gesamtemission des Gases müssen revidiert werden.

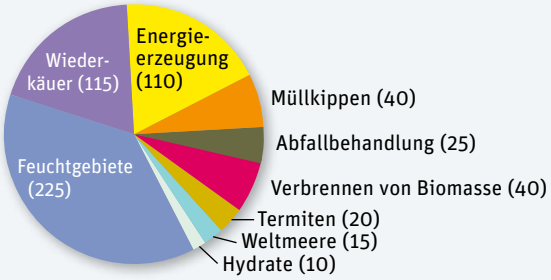
Methan-Konzentration in der Atmosphäre



Methanemissionen in vorindustrieller Zeit
233 Millionen Tonnen pro Jahr



Methanemissionen heute
600 Millionen Tonnen pro Jahr



LAURIE GRACE UND JANA BRENNING

fast einer Million Jahren. Winzige im Eis eingeschlossene Luftblasen geben dabei Aufschluss über die relativen Konzentrationen von Spurengasen in der Atmosphäre (Kasten auf S. 72). Daraus ist unter anderem ersichtlich, dass Schwankungen der Kohlendioxidkonzentration mit Änderungen der globalen Temperaturen einhergehen, die sich ihrerseits aus dem Anteil des schweren Wasserstoffes (Deuterium) im Eis ableiten lassen: Während einer Kaltzeit enthält die Luft wenig, in Wärmeperioden viel von dem Treibhausgas.

Eiszeitliche Schwankungen

Im Allgemeinen variiert der Methangehalt der Atmosphäre parallel zur Kohlendioxidkonzentration und zur Temperatur. Der Grund dafür war bisher unklar. Einige Forscher suchten die Erklärung im Einfrieren und Auftauen von Feuchtgebieten, den vermeintlich einzigen wesentlichen Methanquellen, beim Übergang zwischen Eis- und Warmzeiten. Doch wollte es nicht recht gelingen, mit diesem Mechanismus die merkwürdigen Schwankungen in der atmosphärischen Konzentration des Gases zu reproduzieren.

Ein weiterer Erklärungsversuch greift auf eine Einschlussverbindung aus Methan und Wasser zurück. Unter großem Druck, wie er etwa auf dem Meeresboden herrscht, entstehen bei Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt eisartige Methanhydrate (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/1999, S. 62). Eine unbekannte, aber wahrscheinlich sehr große Menge Methan ist in dieser Form in Ozean-Sedimenten eingeschlossen und könnte bei Druckabfall oder Erwärmung in die Atmosphäre freigesetzt werden.

Eine solche plötzliche Ausgasung wurde oft als möglicher Grund dafür genannt, dass sich die Erde in der fernen Vergangenheit manchmal sehr schnell erwärmte. Jüngste Analysen polarer Eisbohrkerne ergaben jedoch, dass die Methanhydrat-Lagerstätten im Meer seit mindestens 40 000 Jahren intakt sind. Demnach waren sie am abrupten Anstieg der atmosphärischen Methan-Konzentration am Ende der letzten Eiszeit nicht beteiligt.

Worauf aber beruhte er dann? Bekanntlich reagiert die Vegetation auf dem Festland sehr empfindlich auf Umwelteinflüsse. Folglich sollte ihr Ausmaß beim Abkühlen und Aufwärmen der Erde während eines Eiszeitzyklus stark geschwankt haben. Im Licht unserer Resultate kämen diese Veränderungen durchaus als Grund für das Sinken der Methan-Konzentration während der Vereisungsphase und ihren Anstieg zu Beginn der Warmzeit in Frage.

Auf dem Höhepunkt der letzten Eiszeit – vor etwa 21 000 Jahren – waren nicht nur große Teile Nordamerikas und Europas von Eispanzern bedeckt, sondern auch die Wälder Amazoniens nur halb so dicht bewachsen wie heute. Die Vegetation – insbesondere die in den Tropen – dürfte damals also viel weniger Methan freigesetzt haben. Seitdem ist sowohl die globale Oberflächentemperatur als auch der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre gestiegen, was zu einem üp- ▷

Das neue Bild

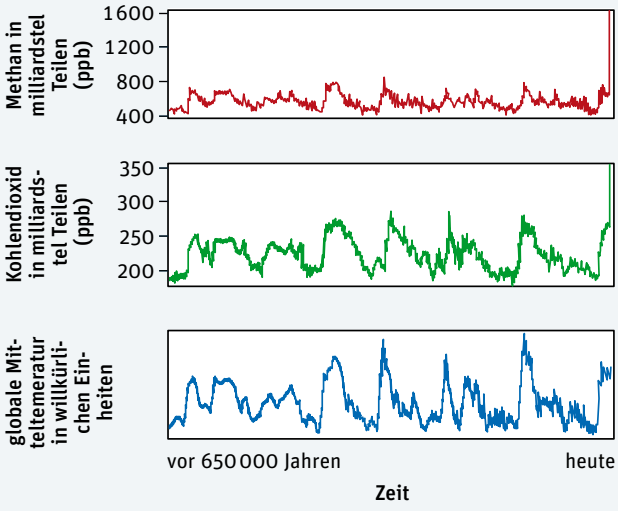
Als die Autoren die von getrockneten Blättern und von lebenden Pflanzen freigesetzten Gase genauestens analysierten, entdeckten sie zu ihrem Erstaunen in beiden Fällen Methan. Diese Emission war bis dahin übersehen worden, obwohl sie angesichts der weltweiten Vegetation insgesamt beträchtliche Ausmaße erreicht. Weil die Autoren ihre Messungen in Kammern ausführten, die sie zuvor mit methanfreier Luft gespült hatten, konnten sie die von den Pflanzen freigesetzte winzige Menge des Gases nachweisen.

Mit dieser Entdeckung lässt sich vielleicht die Beobachtung erklären, dass Schwankungen im Methangehalt der Luft während der vergangenen 650 000 Jahre parallel zu Änderungen der Kohlendioxidkonzentration und der globalen Mitteltemperatur verliefen (Grafik). Das folgt aus Analysen von Eisbohrkernen, die Bläschen mit Luftproben aus der Zeit enthalten, in der sich das Eis bildete. Sie geben so Aufschluss über die Zusammensetzung der Atmosphäre seit fast einer Million Jahre. Der Gehalt des Eises an schwerem Wasserstoff (Deuterium) liefert Information über die Temperatur. Wenn der Kohlendioxidgehalt der Luft zunahm und sich die Erde erwärmte, gedieh die Vegetation höchstwahrscheinlich besser, wodurch vermutlich auch der Methanausstoß stieg.

In Experimenten wie diesem mit Weidelgras untersuchten die Autoren die Gasemission lebender Pflanzen und entdeckten dabei auch winzige Mengen Methan.

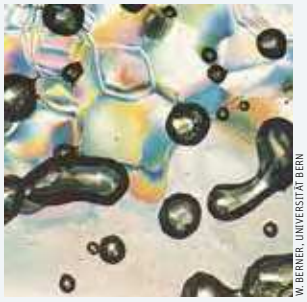
MPI FÜR KERNPHYSIK HEIDELBERG UND FRANK KEPPLER

Parallele Verläufe von Methan, Kohlendioxid und Temperatur



NACH: EDWARD J. BROOK, TINY BUBBLES TELL ALL, SCIENCE BD. 310, S. 1286, 25. NOV. 2005

AFP / GETTY IMAGES



W. BERNER, UNIVERSITÄT BERN

Eisbohrkerne (links außen) enthalten Gasbläschen, die Auskunft über die Zusammensetzung der einstigen Atmosphäre geben. In der Mikroskopaufnahme eines Dünnschnitts in polarisiertem Licht (links) erscheinen sie als dunkle Tröpfchen mit Durchmessern von ein bis drei Millimetern.

pigeren Pflanzenwachstum und vermutlich zu einer verstärkten Methanemission durch die Vegetation geführt hat.

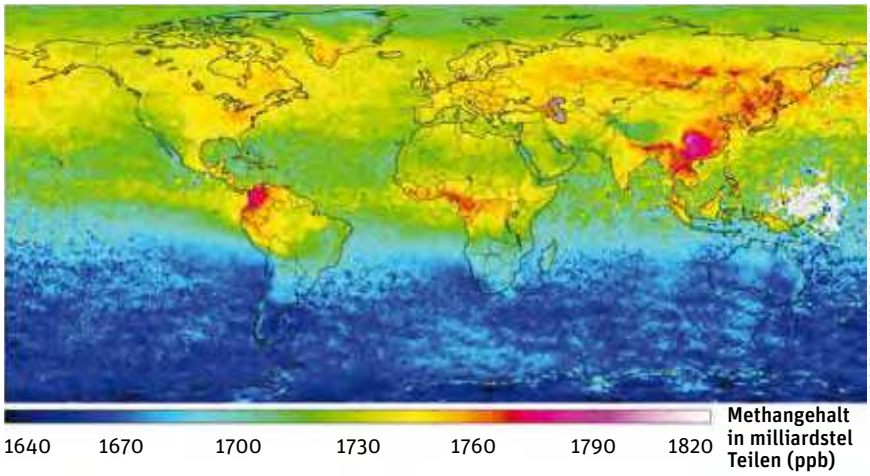
Ähnliches hat sich möglicherweise in anderen Perioden der Erdgeschichte ereignet – namentlich in Zeiten massenhaften Artensterbens wie beim Übergang vom Perm zur Trias (vor etwa 250 Millionen Jahren) und von der Trias zum Jura (vor rund 200 Millionen Jahren). Durch extrem hohe Kohlendioxidkonzentrationen in der Luft in Verbindung mit steigenden Temperaturen könnte die pflanzliche Biomasse damals drastisch zugenommen haben.

Die Folge wäre eine massive Freisetzung von Methan durch die Vegetation und eine noch stärkere Erwärmung. Spekulationen, wonach damals bis zu zehnmal so viel von dem Gas in die Atmosphäre gelangte wie heute, erscheinen nicht völlig unrealistisch. In diesem Fall hätte die Freisetzung von Methan durch Landpflanzen zusammen mit der aus Feuchtgebieten und vielleicht auch vom Meeresboden ein Ausmaß erreicht, in dem sie als Triebkraft für bedeutende Klimaumschwünge gelten könnte.

Wenn man in den BBC World News unmittelbar nach dem Thema Vogelgrippe und Neuigkeiten aus dem Irak einen Bericht über die eigene wissenschaftliche Arbeit sieht – und zwar an dem Tag, an dem die Ergebnisse publiziert wurden – begreift man, dass man auf eine Sache von großem öffentlichem Interesse gestoßen ist. Dieser Eindruck verstärkte sich am nächsten Tag, als Meldungen über unsere Ergebnisse in Zeitungen rund um den Globus erschienen, oft mit Schlagzeilen auf der ersten Seite.

Leider kommt es bei einem so gewaltigen Medienecho leicht zu Fehlinterpretationen und Übertreibungen. So war in vielen Berichten über unsere Resultate

Satellitenbilder von der Erdatmosphäre stützen die kontroversen Ergebnisse der Autoren. Bei der Auswertung solcher Aufnahmen entdeckten Umweltphysiker 2005 hohe Methan-Konzentrationen über den tropischen Waldgebieten. Mit den herkömmlichen Vorstellungen über den Ursprung der weltweiten Methanemissionen lässt sich diese Beobachtung nicht erklären, wohl aber mit der Entdeckung der Autoren, dass Pflanzen das Treibhausgas ausstoßen. Demnach stammen die erhöhten Konzentrationen über den Tropen von der üppigen Vegetation dort.



AUS: C. FRANKENBERG ET AL., SATELLITE CHARTOGRAPHY OF ATMOSPHERIC METHANE. IN: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, BD. 111, D07303, 8. 4. 2006

zu lesen, wir hätten gezeigt, dass Pflanzen für die globale Erwärmung verantwortlich sein könnten. Selbst auf der Titelseite des angesehenen »Guardian« prangte die Schlagzeile »Global Warming – Blame the Forests« (»Globale Erwärmung – die Wälder sind schuld«).

Bekommt man dann auch noch viele E-Mails und Telefonanrufe von Menschen, die fragen, ob sie denn die Bäume in ihrem Garten fällen sollten, um die globale Erwärmung zu bekämpfen, dann merkt man, dass in der Kommunikation mit der Öffentlichkeit etwas grundlegend schiefgelaufen sein muss. Wir sahen uns deshalb gezwungen, eine weitere Pressemitteilung mit einer Klarstellung herauszugeben. Wie wir darin betonten, dauert die von uns festgestellte Methanemission aus Pflanzen schon seit Hunderten von Millionen Jahren an. Sie trägt zum natürlichen Treibhauseffekt bei, ohne den Leben in der heutigen Form nicht möglich wäre. Für den dramatischen Anstieg der Methan-Konzentration in der Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung sind Pflanzen dagegen nicht verantwortlich. Dieser Anstieg wurde durch den Menschen verursacht.

Aufforstung weiterhin sinnvoll

Unsere Entdeckung löste auch vielfach Spekulationen darüber aus, dass die Methanemission durch Pflanzen den Kohlenstoff-Speichereffekt von Aufforstungsprogrammen vermindern oder sogar zunichte machen könnte. Wenn das richtig wäre, hätte es gravierende Konsequenzen für Länder, die gemäß dem Kioto-Protokoll ihre Kohlendioxidemissionen teilweise durch das Anlegen neuer Wälder ausgleichen wollen.

Unsere Rechnungen zeigen jedoch, dass das Anpflanzen von Bäumen, die Kohlendioxid aus der Luft binden, dem Klima weit mehr nützt als ihm der relativ kleine Effekt durch das zusätzlich in die Atmosphäre ausgestoßene Methan schaden könnte: Die Kohlenstoff-Aufnahme von wachsenden Bäumen würde dadurch um höchstens vier Prozent verringert. Es bleibt also dabei, dass das Aufforsten der globalen Erwärmung entgegenwirkt.

Im Eifer der Debatte wird oft eine entscheidende Tatsache übersehen: Pflanzen sind die grüne Lunge des Planeten – sie liefern den Sauerstoff, der das Leben auf der Erde, wie wir es kennen, überhaupt erst ermöglicht. Und sie haben weitere nützliche Funktionen. So fördern sie mit den mannigfachen Lebensräumen, die sie bieten, die Artenvielfalt und steuern den tropischen Wasserkreislauf. Das Problem sind nicht die Pflanzen; das Problem ist, dass wir global und in großem Stil fossile Brennstoffe verbrennen.

Eher berechtigt scheint uns die Frage, ob das von Pflanzen produzierte Methan das Klima in der nahen Zukunft beeinflussen könnte. Zwar hat die Vegetation den massiven Anstieg im Methangehalt der Atmosphäre seit der vorindustriellen Zeit nicht verschuldet. Allerdings könnte sie angesichts steigender Mengen an Kohlendioxid in der Luft tendenziell zunehmen. Dadurch dürfte sich auch ihre Methanemission erhöhen – umso mehr, als Pflanzen mit steigender Temperatur vermutlich mehr von dem Gas ausstoßen. Das aber sollte die Erwärmung noch verstärken.

Obwohl dieser Teufelskreis ein natürliches Phänomen wäre, würde er durch menschliche Aktivitäten wie das Verbrennen fossiler Brennstoffe beschleunigt. Insgesamt jedoch erscheint eine massive Rückkopplung zwischen Vegetation und globalem Klimawandel, wie sie in der Vergangenheit höchstwahrscheinlich vorkam, heute eher unwahrscheinlich, weil so viele Wälder abgeholzt wurden.

Obwohl es für eine detaillierte Aussage darüber, wie unsere Ergebnisse Voraussagen für den Klimawandel in der ferneren Zukunft beeinflussen, zu früh ist, steht doch fest, dass alle neuen Klimaprognosen die Methanemissionen von Pflanzen berücksichtigen müssen. ◁

Frank Keppler (oben) hat im Jahr 2000 an der Universität Heidelberg in Umwelt-Geochemie promoviert. Kürzlich erhielt er den European Young Investigator Award (EURYI), um seine eigene Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz aufzubauen. **Thomas Röckmann** hat 1998 an der Universität Heidelberg in Physik promoviert. Von 2000 bis 2005 forschte er am Max-Planck-Institut für Physik in Heidelberg – ab Oktober 2004 zusammen mit Keppler. 2005 wurde er auf einen Lehrstuhl am Institut für Meeres- und Atmosphärenforschung in Utrecht (Niederlande) berufen.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

»Wir müssen die Zusammensetzung des globalen Methanbudgets neu beschreiben.« Interview mit Frank Keppler in: Spektrum der Wissenschaft 3/2006, S. 24

Veränderungen der Atmosphäre. Von Thomas E. Graedel und Paul J. Crutzen in: Spektrum der Wissenschaft 11/1989, S. 58

Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. Von F. Keppler, J. T. G. Hamilton, M. Brass und T. Röckmann in: Nature, Bd. 439, S. 187, 12. 1. 2006

Climate change 2001: The scientific basis. Von J. T. Houghton et al. (Hg.). Cambridge University Press 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/869374.

FAHRERASSISTENZSYSTEME

Elektronische Schutzengel

Die Kürzel ABS, ASR und ESP versprechen Rettung, wenn ein Fahrer die Kontrolle über seinen Wagen zu verlieren droht.

Von Bernhard Gerl

Als Wilhelm Maybach und Gottfried Daimler 1886 eine Kutsche mit einem Benzinmotor aufrüsteten und dann mit 18 Kilometer pro Stunde von Stuttgart nach Untertürkheim »rasten«, verschwendeten sie nicht allzu viele Gedanken an das Bremsen. Die vorhandene Vorrichtung der Pferdekutsche genügte: Klotzbremsen, per Handkurbel auf die Hinterräder gepresst. Heute beschleunigen manche Autos in zwanzig Sekunden von null auf 200 und kommen dank hydraulischer Scheibenbremsen bei einer Vollbremsung in fünf Sekunden zum Stehen – sofern die Reifen auf der Fahrbahn haften. Rutschen und gleiten sie jedoch, etwa auf regennasser Fahrbahn, greifen Fahrerassistenzsysteme ein und versuchen, den Wagen stabil zu halten. Das Antiblockiersystem (ABS) gehört bereits zur Serienausstattung, während das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) erst ab der Mittelklasse Standard ist. In jedem ESP ist zudem auch die Antriebsschlupfregelung (ASR) enthalten.

Ein bisschen Schlupf muss sein: Wenn Reifen etwas durchrutschen, werden die Kräfte des Motors am besten auf die Straße übertragen. Zehn bis dreißig Prozent darf die Umfangsgeschwindigkeit des Rads größer oder kleiner als die des Fahrzeugs sein. Durchdrehen darf es freilich nicht, etwa wenn der Reifen bei starker Beschleunigung auf einer rutschigen Fahrbahndecke die Haftung verliert. Die Antriebsschlupfregelung misst die Drehgeschwindigkeit der einzelnen Räder, ermittelt zu hohen Schlupf und bremst das entsprechende Rad ab, bis es wieder greift.

Nicht minder gefährlich wird es bei einem Schlupf von null, das heißt, wenn das Rad blockiert und gleitet. Reifen und Untergrund treten dann nämlich deutlich weniger in Kontakt, die Gleitreibung ist deshalb erheblich geringer als die Rollreibung. Zudem vermag der Reifen dann keine Seitenkräfte zu übertragen – das Fahrzeug ist nicht mehr lenkbar. Blockieren die Reifen in einer Kurve, driftet es deshalb nach außen oder kommt ins Schleudern. Schon vor rund hundert Jahren fanden Ingenieure die Lösung: die Stotterbremse. Aber erst 1978 war es mit Hilfe der Elektronik erstmals möglich, robuste und bezahlbare Systeme in Serie zu bringen. Heute erledigt das ABS, was früher der Fahrer geistesgegenwärtig im Gefahrenfall selbst besorgen musste: den Druck an der Bremse kurzzeitig zu unterbrechen, bis der Reifen wieder greift.

Zur Erfassung der Raddrehzahl werden meist so genannte Hall-Sensoren verwendet, die sehr feine Änderungen eines Magnetfelds messen können. Hierzu dreht sich mit der Radnabe beispielsweise ein stählernes Rad, auf dem Magnete mit wechselnder Polarität aufgebracht sind.

ABS und ASR sind Elemente des Elektronischen Stabilitätsprogramms, das in jeder Fahrsituation versucht, ein Auto auf dem gewünschten Kurs zu halten. Dazu vergleicht die Elektronik 150-mal in der Sekunde die Vorgaben des Fahrers – also Lenkrad-, Gas- beziehungsweise Bremspedalstellung – mit den tatsächlichen Fahrdaten. Droht ein Fahrzeug ins Schleudern zu geraten, reduziert das ESP die Motorleistung und bremst einzelne Räder gezielt ab. So erzeugt es Drehmomente im Fahrzeug, die die ungewollte Schleuderbewegung kompensieren. Wird beispielsweise eine Kurve zu schnell angefahren, beginnt der Wagen dann nicht zu gieren – also sich um seine senkrechte Achse zu drehen – und schleudern, sondern driftet schlimmstenfalls nach außen und ist dadurch wesentlich besser beherrschbar.

Das ESP empfängt Daten von diversen Sensoren. Diese erfassen beispielsweise die Umfangsgeschwindigkeiten und Drehrichtungen der Räder, die Stellung des Lenkrads, Dreh- und Kippbewegungen des Wagens. Um linear wirkende Beschleunigungen zu messen, kommen oft wieder Hall-Sensoren zum Einsatz. Sie werden mit einer hochkant gestellten bandförmigen Feder kombiniert, auf die ein Magnet aufgesetzt ist. Driftet der Wagen zum Beispiel seitlich weg, wird die Feder ausgelenkt und damit das Magnetfeld im Messbereich des Sensors verändert. Um beginnendes Schleudern des Fahrzeugs zu entdecken und die Drehrate um die Hochachse zu messen, nutzt man mikromechanische Sensoren. In diesen werden wenige Mikrometer große Siliziumplatten in Schwingung versetzt. Giert der Wagen, wird deren seitliche Auslenkung registriert.

Befürchtungen, die Hilfe der Assistenzsysteme könnte manchen zu einer riskanteren Fahrweise verleiten, halten die Automobilhersteller Studien entgegen, die zeigen, dass seit Einführung von ESP die Zahl der Unfälle zurückging (siehe Kasten). Die nächste Generation steht deshalb bereits in den Startlöchern: Die Elektronik soll direkt auf die Lenkung und die Bremsen zugreifen können, außerdem auf Motor, Stoßdämpfer und Stabilisatoren des Fahrwerks. Der Fahrer gibt weiterhin die Richtung vor, der Bordcomputer greift bei Bedarf jedoch korrigierend ein. Tatsächlich gibt es bereits Limousinen, in denen elektronisch gesteuerte Elektromotoren im Gefahrenfall das Gegenlenken übernehmen oder dem Fahrer zeigen, wo es langgehen sollte: Will er das Lenkrad falsch einschlagen, muss er dafür mehr Kraft aufwenden als bei Lenkung in die nach Datenlage optimale Richtung.

Bernhard Gerl ist freier Autor in Mainz.

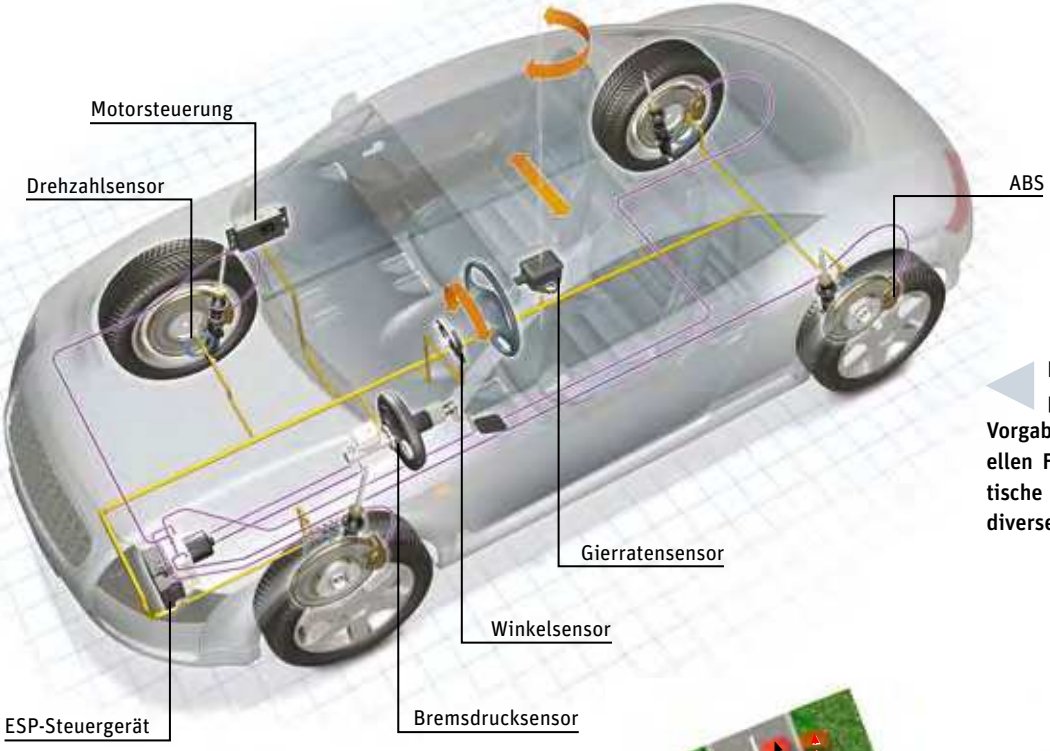
Wussten Sie schon?

▶ **Bei Eis und Schnee** sollte man zwar behutsam und vorsichtig fahren, doch wenn das Fahrzeug über ABS verfügt, gilt: im Gefahrenfall voll auf die Bremse! Denn ABS regelt den Schlupf der Räder so, dass sie maximal verzögern – so gut es auf der glatten Fahrbahn eben geht.

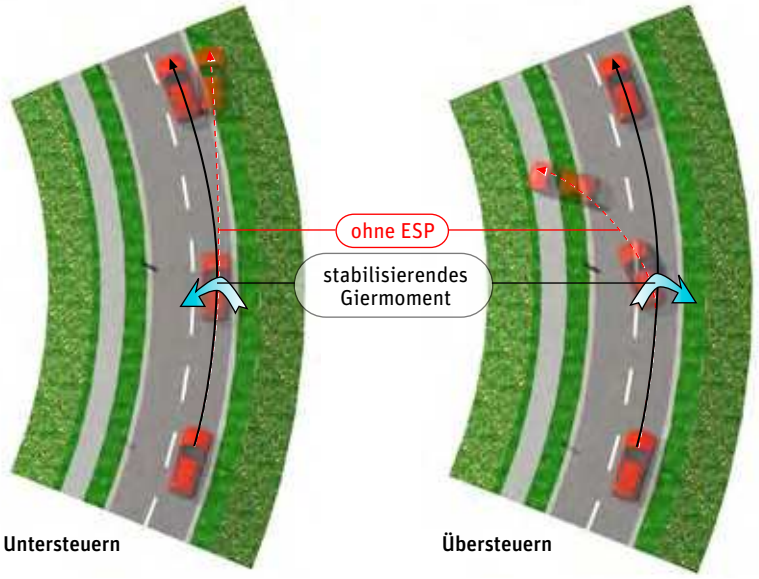
▶ **Der so genannte Elchtest** brachte dem ESP den Durchbruch auf dem Markt. 1997 versagte ein Fahrzeug der gerade neu entwickelten Mercedes-A-Klasse in Schweden bei einem Test, der das Ausweichen bei einem auf die Fahrbahn tretenden Elch simulierte. Der Wagen überschlug sich. Erst nach Fahrwerksmodifikationen und serienmäßiger Ausstattung mit ESP kam die A-Klasse wieder auf den Markt. Der Elchtest wurde inzwischen unter dem Namen Spurwechseltest vom Verband der deutschen Automobilindustrie genormt.

▶ **ESP soll verhindern,** dass ein Wagen ins Schleudern gerät. Dementsprechend müsste seine Verbreitung vor allem Unfälle vermeiden helfen, in die nur ein Fahrzeug verwickelt ist. Tatsächlich belegen einige Studien diesen Effekt. Forscher des Unternehmens Toyota analysierten japanische Unfallstatistiken aus dem Jahr 2001 und kamen zu dem Schluss, dass die Zahl der Alleinunfälle dank ESP um 30 Prozent zurückgegangen war, bei Beschränkung auf schwere Alleinunfälle erhöhte sich diese Effektivität auf 50 Prozent. Amerikanische Institute kamen zu ähnlichen Ergebnissen. Die schwedische Straßenbehörde unterschied nicht zwischen Alleinunfällen und solchen mit Beteiligung anderer Fahrzeuge und berechnete die Effektivität von ESP mit etwa 22 Prozent. Auf nassen Straßen stieg sie um rund 10 und auf Fahrbahnen mit Schnee und Eis sogar um etwa 18 Prozent.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANIM, NACH: BERNHARD GERL



Das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) vergleicht die Vorgaben des Fahrers mit dem aktuellen Fahrzeugzustand. Ist eine kritische Situation zu erwarten, treten diverse Komponenten in Aktion.



Beim Untersteuern (links) schieben die Hinterräder das Auto über die in Kurvenrichtung weisenden Vorderräder weiter geradeaus, in einer Linkskurve droht das Fahrzeug nach rechts auszubrechen. Deshalb wird das kurveninnere Hinterrad vom ESP abgebremst. Es entsteht ein nun nach innen gerichtetes Giermoment und der Wagen folgt dem gewünschten engeren Kurvenradius. Beim Übersteuern (rechts) drängt das Heck in der Kurve zum Außenrand der Straße. Ohne Gegenlenken besteht die Gefahr, dass der Wagen auf die Gegenfahrbahn gerät. Das ESP bremst dann das kurvenäußere Vorderrad ab. Es entsteht ein Giermoment, das der Schleuderbewegung entgegenwirkt.

Laser aus Silizium

Endlich ist es Wissenschaftlern gelungen, mit dem gängigsten Halbleitermaterial Laserstrahlen zu erzeugen. Schon in wenigen Jahren werden Computer und andere Geräte mit Licht ebenso selbstverständlich umgehen wie mit Elektronen.

Von Bahram Jalali

Billige Siliziumchips manipulieren Elektronenströme und erfüllen dadurch unzählige nützliche Aufgaben in Computern, Mobiltelefonen und in der gesamten Unterhaltungselektronik. Wenn integrierte Silizium-Schaltkreise zudem Lichtstrahlen erzeugen und steuern könnten, entstünde preiswerte neue Technik für eine Fülle weiterer Anwendungen. Doch jahrzehntelang scheiterten alle hartnäckigen Bemühungen der Wissenschaftler, Silizium in eine Quelle konzentrierten Lichts zu verwandeln.

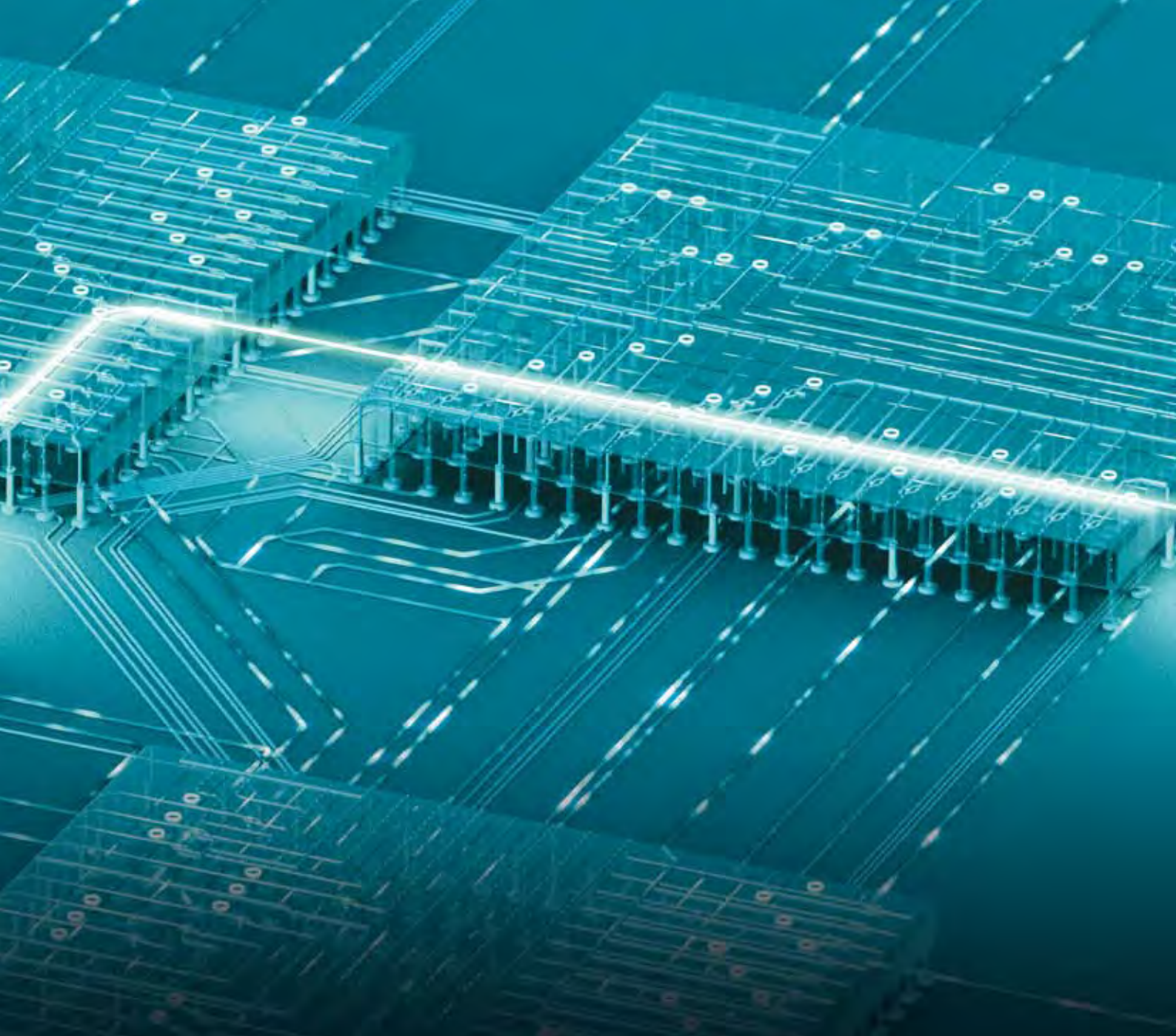
Nun ist meinem Forscherteam und einigen anderen das Kunststück tatsächlich gelungen. Dieser Durchbruch könnte enorme Folgen für elektronische Geräte haben, die Laser und optische Verstärker enthalten; derzeit bleiben sie auf Lasermaterialien angewiesen, die viel teurer und seltener sind als Silizium.

Würden herkömmliche Kupferkontakte und -drähte durch optische Leitungen ersetzt, so stiege das Tempo der Datenübertragung um mehrere Größenordnungen. Zum Beispiel schaffen die für private Internetanschlüsse gebräuchlichen Kabelmodems bestenfalls ein Megabyte pro Sekunde. Hingegen könnten optische Bauelemente auf Siliziumchips mühelos riesige Dateien, etwa hochauflösende Videofilme, mit bis zu zehn Gigabit pro Sekunde übertragen – eine zehntausendfache Verbesserung. Kompakte Sensoren, die integrierte Schaltkreise mit Siliziumlasern enthalten, könnten die Vorteile eines diagnostischen »Labors auf einem Chip« mit denen des drahtlosen Funkverkehrs vereinen, um im Rahmen umfassender Umweltüberwachungs- und Sicherheitsnetze Schadstoffe, chemische Kampfmittel oder Sprengstoffe aufzuspüren. Auf militärischem Gebiet wären Siliziumlaser ein billiges Mittel, die Infra-

rotsensoren wärmesuchender Flugabwehrraketen auszutricksen.

Warum hat es so lange gedauert, Silizium den neuen Trick beizubringen? Im Gegensatz zu gängigen Lasermedien wie dem in DVD-Playern verwendeten Galliumarsenid unterstützt Silizium nicht von Natur aus den zweistufigen Prozess, der zu einem kohärenten Lichtstrahl führt. Laser ist die Abkürzung für *light amplification by stimulated emission of radiation*, zu Deutsch Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission. Weder emittiert Silizium bei Anregung genügend Licht, noch vermag es das spärlich produzierte Licht durch die stimulierte Emission weiterer Photonen zu einem Laserstrahl zu verstärken.

Im Laser »pumpt« eine externe Energiequelle – meist Licht oder Strom – die Elektronen in den Atomen des aktiven Mediums auf ein höheres Energieniveau. Wenn sie von diesem Anregungszustand in ihren Grundzustand zurückfallen, wird die überschüssige Energie in Form von Lichtquanten oder Photonen frei. Albert Einstein nannte den Vorgang spontane Emission: Die erzeugten Photonen pflanzen sich zufällig in alle Richtungen fort, wodurch diffuses Licht geringer Intensität entsteht – wie bei einer Leuchtstoffröhre. Pas- ▷

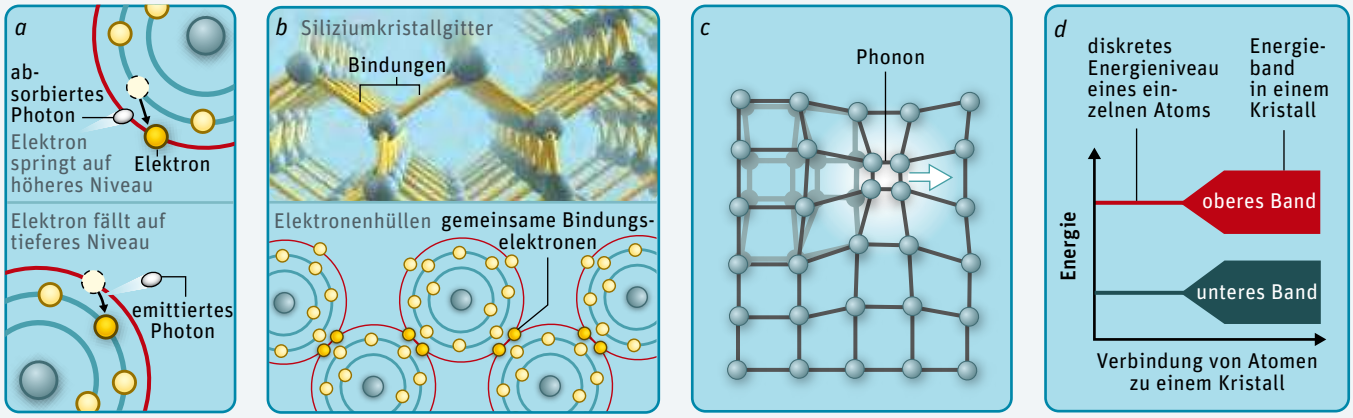


LASERLICHTFLECK LINKS: UCLA; ILLUSTRATION: BRYAN CHRISTIE DESIGN

▲ Dieser rotweiße Fleck (kleines Bild) dokumentiert den ersten je von einem Siliziumgerät erzeugten Laserstrahl. Seine für das Auge unsichtbare Infrarotstrahlung wird hier in Falschfarben wiedergegeben. In Mikroprozessoren integrierte Siliziumlaser versprechen für die absehbare Zukunft billige Datenverarbeitung mit Licht (Hintergrund).

Warum Silizium ein schlechtes Medium für Laser abgibt

Das gängigste Halbleitermaterial verspricht zwar besonders kostengünstige Datenverarbeitung mit Licht, aber die natürlichen Eigenschaften von Silizium stehen seiner Verwendung als Lasermedium im Weg. In einem guten Lasermaterial funktio-



Laserstrahlung beruht auf dem Quantenverhalten der äußeren Elektronen in den Atomen eines geeigneten Materials. Ein Hüllenelektron wird durch Absorption eines Photons – eines Lichtquants – »gepumpt«, das heißt auf ein höheres Energieniveau angehoben *(a)*. Fällt ein angeregtes Elektron auf ein niedrigeres Niveau zurück, setzt es ein Photon frei.

In einem Festkörper sind die Atome gebunden, indem sie die Außenelektronen miteinander teilen *(b)*. Um ein Lasermaterial zur Emission intensiven Lichts anzuregen, pumpt eine externe Energiequelle die gemeinsamen Elektronen auf höhere Energieniveaus. Die angeregten Elektronen setzen Photonen frei, die ihrerseits die Emission weiterer Photonen stimulieren – das Licht wird verstärkt. Photonen können auch durch Wechselwirkung mit so genannten Phononen verstärkt werden, den Quanten der Atomschwingungen im Kristallgitter *(c)*. Wenn sich einzelne Atome zu Kristallen verbinden, bilden die Energieniveaus der gemeinsamen Elektronen breitere Bänder, weil der Einfluss der vielen benachbarten Atome die scharfen Niveaus verschmiert *(d)*. Im Kristall springt ein gepumptes Elektron darum von einem Band zum anderen.

Das Band beschreibt mögliche Quantenzustände für die Elektronen; jedem Zustand ist ein Impuls zugeordnet, der bei Kollisionen erhalten bleiben muss. Das Energie-Impuls-Diagramm der Elektronen in einem üblichen Lasermedium wie Galliumarsenid zeigt vertikal übereinander liegende Energiebänder, da sie praktisch denselben Impuls besitzen *(e)*.

Doch bei Silizium haben die Bänder unterschiedliche Impulse. Darum reicht die Energie eines absorbierten Photons allein noch nicht aus, ein Elektron in ein höheres Band zu befördern *(f)*. Statt-

▷ siert jedoch eines dieser emittierten Photonen eine Gruppe zuvor gepumpter Elektronen im aktiven Medium so veranlasst – stimuliert – es sie, ihre überschüssige Energie auf einmal abzugeben.

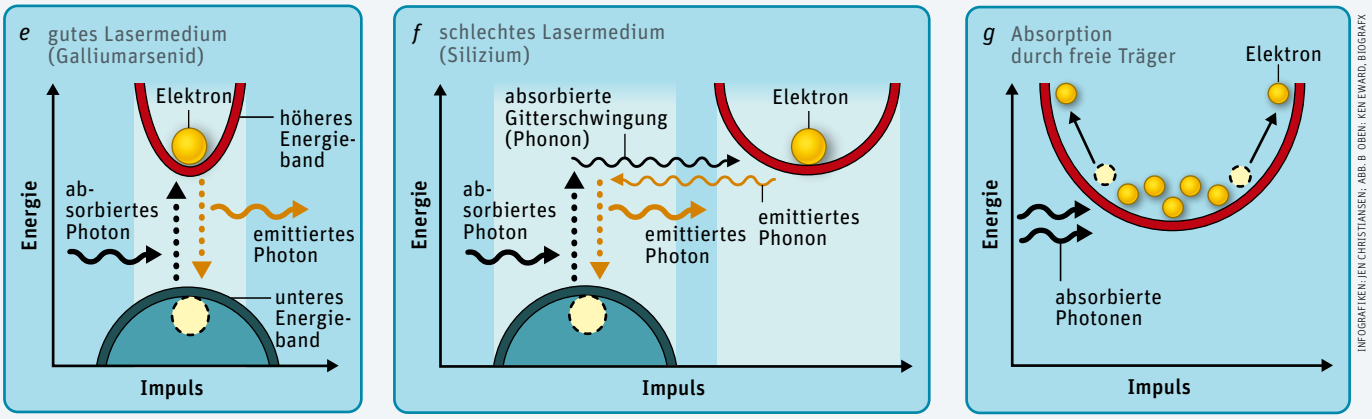
Da die dabei entstehenden Photonen sich synchron und in derselben Richtung fortpflanzen, bilden sie einen intensiven Lichtstrahl. Während er andere angeregte Atome des Mediums passiert, stimulieren seine Photonen ihrerseits die Emission weiterer Photonen. Dieser Kaskadeneffekt gleicht dem Anwachsen einer Lawine, die auf ihrem Weg ins Tal immer mehr Schnee mit sich reißt. Die Grundidee, von Einstein erstmals in den Jahren 1916 und 1917 publiziert, erregte zunächst kaum Interesse. Erst in den 1950er Jahren erkannten Physiker allmählich, welche Anwendungsmöglichkeiten sich daraus für optische oder photonische Geräte ergaben.

1958 schlugen die amerikanischen Physiker Charles Townes und Arthur Schawlow vor, ein Licht verstärkendes Material teilweise mit Spiegeln zu umgeben, um einige der darin erzeugten Photonen zurück ins Innere zu reflektieren. Der Stimulierungsprozess würde dann wie eine Kettenreaktion von selbst weiterlaufen. Diese Methode könnte, wäre sie erst einmal technisch ausgereift, einen intensiven Lichtstrom von wohldefinierter Wellenlänge erzeugen – einen Laserstrahl. Nur zwei Jahre später präsentierte Theodore Maiman den ersten funktionsfähigen Laser, bei dem ein Ru-

In Kürze

- Seit Langem suchen Wissenschaftler nach einem **Siliziumchip**, der **mit Licht** ebenso flexibel umgeht wie mit Elektronen. Solche Mikroprozessoren würden unter anderem ultraschnelles Übertragen digitaler Daten und billige Sensornetze ermöglichen.
- Leider ist Silizium **von Natur aus keine gute Quelle** für Licht, schon gar nicht für intensives Laserlicht.
- Durch raffinierte Tricks ist es Forschern nun doch gelungen, Silizium zum Aussenden von Laserlicht zu bringen. Damit gerät die **Elektrophotonik** in Reichweite – eine neuartige Hybridtechnik, die mit Strom und Lichtquanten auf einem einzigen Chip operiert.

niert die so genannte stimulierte Emission: Die auf ein höheres Energieband gepumpten Elektronen geben ihre Energie alle auf einmal ab und erzeugen eine Kaskade kohärenter Photonen. In Silizium verpufft diese Energie größtenteils als Wärme.



INFOGRAFIKEN: JEN CHRISTIANSEN; ABB. B OBEN: KEN EWARD, BIOGRAFX

dessen muss das Elektron warten, bis ein Phonon mit genau passendem zusätzlichem Impuls auftaucht und den Energieaustausch vermittelt. Leider verlieren solche Elektronen ihre überschüssige Energie oft in Form von Wärme, bevor ein geeignetes Phonon erscheint. Aus diesem Grund ist Silizium eine schlechte Lichtquelle.

Wegen des geringen Emissionswirkungsgrads von Silizium wird die für Laser nötige Lichtverstärkung zusätzlich durch die so genannte Freie-Träger-Absorption behindert. Bei Wechselwirkung eines ankommenden Photons mit einem angeregten Elektron – einem freien Träger – konkurrieren zwei Prozesse miteinander: Entweder stimuliert das Photon die Emission eines weiteren Photons, wodurch das Elektron auf ein tieferes Band fällt, oder das Elektron absorbiert einfach das Photon und klettert dadurch im selben Band etwas höher *(g)*. Der zweite Prozess erzeugt kein weiteres Photon und trägt somit nichts zur Lichtverstärkung bei.

Bei Galliumarsenid erscheint das obere Band im Energie-Impuls-Diagramm eng, mit steilen Flanken; darum bieten die oberen Bänder relativ wenigen Elektronen Platz. Da Galliumarsenid auf Grund der vertikalen Ausrichtung seiner Bänder Licht effizient emittiert, übersteigt die Emission von Photonen bei Weitem deren Absorption, und das Material ist ein guter Lichtverstärker. Um hingegen die breiteren und weniger steilwandigen Bänder von Silizium aufzufüllen, sind mehr Elektronen nötig. Wegen seiner schlechten Emissionsrate – bedingt durch die indirekte Bandlücke – und seiner hohen Absorptionsrate – durch freie Träger – ist Silizium nicht geeignet, Licht zu verstärken.

binkristall mit einer leistungsstarken Lampe optisch gepumpt wurde.

Doch Silizium verhält sich viel widerspenstiger als Rubinkristalle und andere später entwickelte Lasermedien. Als Halbleiter liegt es mit seinem elektrischen Verhalten etwa in der Mitte zwischen einem hervorragenden Leiter wie Kupfer und einem Isolator wie Gummi oder Keramik. In Halbleitern besetzen die Elektronen so genannte Energiebänder, das heißt nur ganz bestimmte Bereiche erlaubter Energieniveaus oder -zustände.

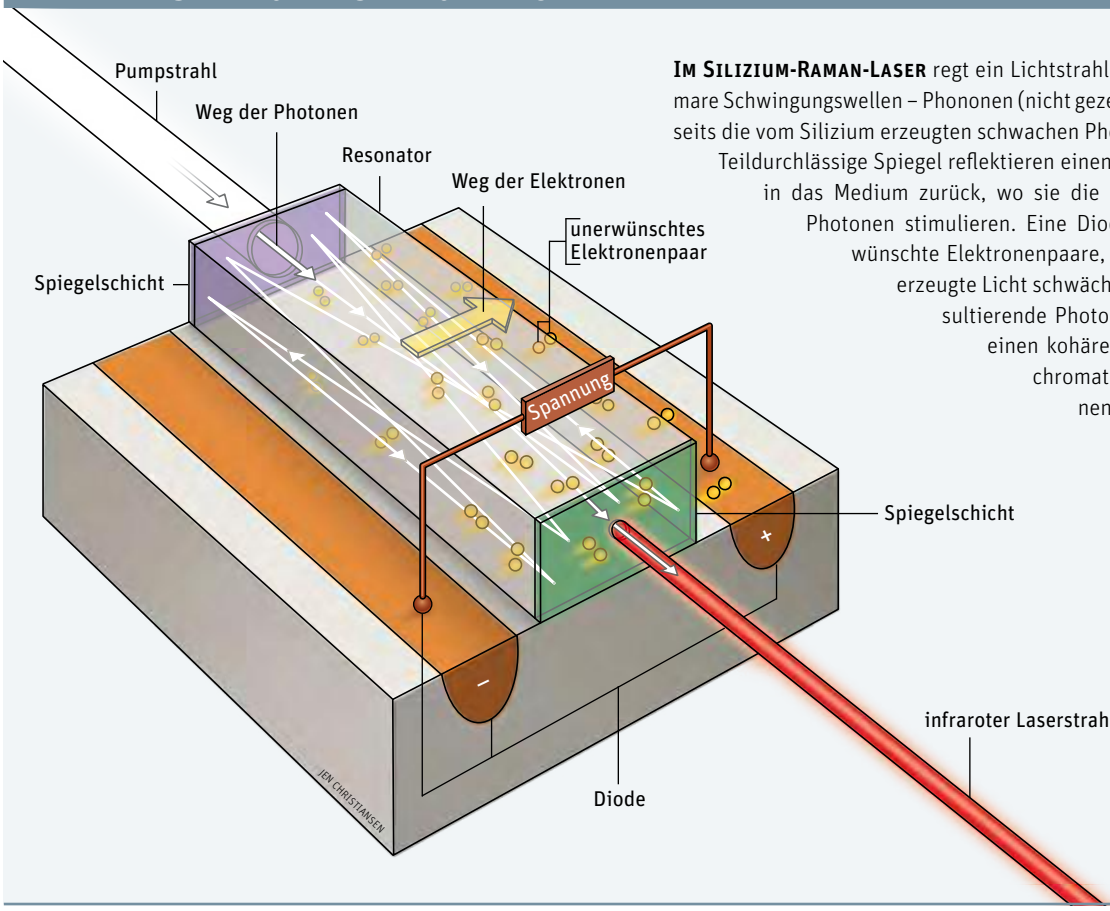
Zwischen zwei Energiebändern klafft stets eine Bandlücke, deren Besetzung den Elektronen durch die Quantentheorie verboten ist. Elektronen, die relativ lose in den äußeren Atomhüllen sitzen, können durch Absorption eines Photons in ein höheres Band springen oder durch Emission eines Photons in ein niedrigeres zurückfallen. Physiker beschreiben diese Wechselwirkungen als eine Art Streuprozess. Die Energiebänder lassen sich als Töpfe veranschaulichen, in denen Elektronen sitzen (Kasten oben).

Normalerweise halten sich fast alle Elektronen im unteren Topf oder Energieband auf, und das obere Band bleibt fast leer. Doch wenn ein Photon, dessen Energie mindestens so groß ist wie die Bandlücke, mit einem Elektron kollidiert, vermag es dieses auf das obere Band anzuheben. Das Elektron hüpft vom niedrigeren Topf in einen höheren. Dieser Effekt – die Lichtabsorption – dient in Solarzellen dazu, Licht in Strom umzuwandeln.

Wenn das Material hingegen Photonen erzeugen soll, muss es so viel Energie aufnehmen, dass viele Elektronen vom unteren ins obere Band gepumpt werden. Auf diese Weise entsteht eine so genannte Besetzungsinversion, das heißt die übliche Verteilung der Elektronen auf die Energiebänder kehrt sich praktisch um. Dazu reicht es aus, die Elektronen am oberen Rand des niedrigeren Bandes über die Lücke hinaufspringen zu lassen. In Halbleiterdioden werden die Elektronen meist direkt durch elektrischen Strom angeregt. Sie können jedoch auch gepumpt werden, indem das Medium, wie von Maiman demonstriert, mit einer äußeren Lichtquelle bestrahlt wird.

Die Elektronen im oberen Band geben schließlich Energie ab und emittieren dabei Photonen. Wenn die erzeugten Photonen einen Halbleiter mit Besetzungsinversion durchqueren, in dem viele Elektronen im oberen Band sitzen, stimulieren sie die Emission weiterer Photonen. Im besten Fall entspricht die Emission des Halbleiters der absorbierten Energie. Obwohl die Elektronen und Photonen bei diesen Emissions- und Absorptionsprozessen Energie austauschen, bleibt die Gesamtenergie des Systems er- ▷

Wie ein Siliziumlaser funktionieren kann



Im Silizium-Raman-Laser regt ein Lichtstrahl im Resonator atomare Schwingungswellen – Phononen (nicht gezeigt) – an, die ihrerseits die vom Silizium erzeugten schwachen Photonen verstärken. Teildurchlässige Spiegel reflektieren einen Teil der Photonen in das Medium zurück, wo sie die Emission weiterer Photonen stimulieren. Eine Diode beseitigt unerwünschte Elektronenpaare, die ansonsten das erzeugte Licht schwächen würden. Die resultierende Photonenkaskade bildet einen kohärenten Strahl monochromatischen Lichts – einen Laserstrahl.

▷ halten – das heißt, Gewinne und Verluste halten sich genau die Waage, wie es sich nach dem Gesetz der Energieerhaltung gehört. Absorption und Emission können aber nur stattfinden, wenn außerdem gemäß dem Impulssatz auch der Impuls erhalten bleibt. Beim Photon, das sich als Zwitter von Teilchen und Welle durch den Kristall fortpflanzt, hängt der Impuls direkt von der Wellenlänge ab; diesen Impuls kann man als Tendenz des Photons deuten, sich weiter in derselben Richtung zu bewegen. Ein Energieband wiederum beschreibt mögliche Quantenzustände von Elektronen, und jedem dieser Zustände lässt sich ein Impuls zuordnen, der bei Stoßprozessen erhalten bleiben muss.

Als Quanten reiner Energie tragen Photonen bei Streustößen wenig zum Gesamtimpuls bei. Darum funktioniert der Übergang von einem Energieband zum anderen am besten, wenn das obere und das untere Band – Anfangs- und Endpunkt des Übergangs – praktisch denselben Impuls haben. Das ist bei gebräuchlichen Lasermedien wie Galliumarsenid und Indiumphosphid der Fall; in einem Energie-Impuls-Diagramm liegen ihre Energiebänder direkt übereinander. Dadurch können ein Elektron und ein Photon problemlos Energie austauschen. Ob ein Material diese so genannte direkte Bandlücke aufweist, hängt von der Anordnung der Atome in seinem Kristallgitter ab.

Widerborstiges Lasermedium

Silizium hat jedoch eine indirekte Bandlücke – das heißt, zwischen seinen oberen und unteren Energiebändern herrscht ein großer Impulsunterschied. Folglich können die Elektronen nicht so einfach Energie mit einem Photon austauschen, ohne den Impulssatz zu verletzen. Sie müssen warten, bis im Siliziumkristall eine Gitterschwingung – ein so genanntes Phonon – mit genau passendem Impuls auftritt und den für einen Energieaustausch erforderlichen Zusatzimpuls liefert. Leider geben die Elektronen im Silizium ihre Pumpenergie häufig schon in Form von Wärme ab, bevor ein passendes Phonon auftaucht. Infolgedessen hat Silizium einen geringen Emissionswirkungsgrad; nur jedes millionste angeregte Elektron setzt erfolgreich ein Photon frei. Die Effizienz herkömmlicher Lasermedien wie Galliumarsenid ist rund zehntausendmal höher.

Eine indirekte Bandlücke begrenzt zwar die Effizienz eines Siliziumlasers, lässt aber im Prinzip die Emission von Laserlicht zu. Doch bei Silizium kommen zwei weitere Hindernisse hinzu. Das erste ist die so genannte Absorption durch freie Träger, ein Prozess, der sich innerhalb eines Energiebands abspielt. Stellen wir uns eine Gruppe von Elektronen vor – die freien Träger –, die auf ein oberes Band gepumpt worden sind. Wenn ein ankommendes Photon mit einem angeregten Elektron wechselwirkt, kann zweierlei geschehen. Im günstigen Fall veranlasst das Photon das Elektron, in ein tieferes Band zu fallen, stimuliert dadurch die Emission eines weiteren Photons und fördert den Prozess der Lichtverstärkung. Im ungünstigen Fall wird das Photon vom Elektron absorbiert, und dieses klettert dann bloß im oberen Band ein wenig höher, ohne ein weiteres Photon zu erzeugen. Welcher dieser rivalisierenden Effekte überwiegt,

hängt von der Anzahl der gepumpten Elektronen im oberen Energieband ab.

In guten Lasermedien wie Galliumarsenid bilden die oberen Bänder schmale Töpfe mit steilen Wänden, die relativ wenige Elektronen aufnehmen. Bei Silizium sind die Töpfe breiter und flacher; darum sind mehr Elektronen nötig, um die oberen Bänder aufzufüllen. Wird Silizium gepumpt, so neigt es zu starker Absorption durch freie Träger. Da Galliumarsenid wegen seiner direkten Bandlücke eine hohe Emissionsrate aufweist, übersteigt die Erzeugung von Photonen bei Weitem deren Absorption. Silizium hingegen hat eine niedrige Emissionsrate wegen seiner indirekten Bandlücke und außerdem eine hohe Freie-Träger-Absorptionsrate; darum ist es unfähig, Licht zu verstärken.

Das zweite Hindernis ist ein ungewöhnlicher Prozess namens Auger-Rekombination. Statt Licht zu emittieren, verliert ein Elektron im oberen Band seine Energie an andere Elektronen, die daraufhin ihre überschüssige Energie als Wärme abgeben. Der Betrag der auf diese Weise verschwendeten Lichtenergie hängt von der Anzahl der Elektronen im oberen Band ab. Silizium neigt stärker zur Auger-Rekombination als Galliumarsenid, weil zum Ausgleich seiner geringen Emissionseffizienz mehr Elektronen in das höhere Band gepumpt werden müssen.

In den vergangenen fünf Jahren haben Forscher Mittel und Wege gefunden, diese natürlichen Hindernisse zu überwinden. Eine Methode nutzt ein Phänomen namens Quanteneinschluss *(quantum confinement)*, das auftritt, wenn die Elektronenbewegung in bestimmten Richtungen eingeschränkt ist. Bei dreidimensionaler Einschränkung – in einem so genannten Quantenkäfig – gerät das Elektron in umso heftigere Schwingungen, je kleiner der Käfig ist. Dies folgt aus der Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation: Je genauer ein Elektron lokalisiert wird, desto unbestimmter wird sein Impuls. Dadurch lockert sich die Bedingung der Impulserhaltung für den Energietransfer zwischen Elektron und Photon, und die Lichtemissionsrate des Halbleiters steigt.

Als Quantenkäfig für Silizium dient den Forschern ein dünner Film aus Quarzglas (Siliziumdioxid), in den winzige Partikel kristallinen Siliziums eingebettet sind. Diese Nanokristalle sind nur wenige Atomdurchmesser groß und bewirken den Quanteneinschluss; durch Bestrahlen mit einer externen Lichtquelle können sie gepumpt werden. Im Jahr 2000 fand die Arbeitsgruppe um Lorenzo Pavesi an der Universität Trient (Italien) erstmals Indizien für optische Verstärkung in Silizium-Nanokristallen. Diese Ergebnisse wurden zunächst skeptisch aufgenommen, aber Philip Fauchet von der Universität Rochester (US-Bundesstaat New York) und andere haben den Effekt inzwischen bestätigt. Obwohl daraus noch kein Laser hervorgegangen ist, regte der Effekt weitere Innovationen mit ermutigenden Resultaten an.

Trickreicher Quanteneinschluss mit Seltenen Erden

Einen Fortschritt brachte der Quanteneinschluss mit Erbium und anderen Seltenen Erden, die als gute Lichtemitter bekannt sind. Oft wird Erbium dem Glas von Lichtleitern zugesetzt, um optisch gepumpte Verstärker und Laser für Telekommunikationsnetze herzustellen. Führend bei der Erforschung dieser Methode zur Verbesserung der optischen Leistung von Silizium sind Francesco Priolo von der Universität Catania (Italien) und Salvatore Coffa von der Firma STMicroelectronics in Genf (Schweiz). So entwickelte Coffas Arbeitsgruppe Leuchtdioden (LEDs), die bei Zimmertemperatur einen ähnlichen Wirkungsgrad haben wie Galliumarsenid-Bauelemente.

Die Leuchtdiode von STMicroelectronics ist eine sandwichförmig geschichtete Metall-Glas-Halbleiter-Struktur, in der eine zwischen Metall und Halbleiter angelegte Spannung die Elektronen durch das Glas beschleunigt. Diese Elektronen pumpen die Elektronen der Erbiumatome im Glas und veranlassen sie, Licht zu emittieren. In diesem Fall spielt der Quanteneinschluss in den Nanokristallen eine eher bescheidene Rolle: Er erhöht die Leitfähigkeit des Glases, wodurch die Erzeugung des Elektronenflusses weniger Spannung erfordert. Obwohl die LED-Technik äußerst nützlich ist, erzeugt sie kein Laserlicht mittels stimulierter Emission, sondern nur diffuses Licht, das durch spontane Emission entsteht. Allerdings sind die Forscher bei STMicroelectronics zuversichtlich, dass es ihnen bald gelingen wird, aus mit Erbium dotiertem Silizium einen echten Laser zu bauen.

Jüngst hat das Team von James Xu an der Brown-Universität in Providence (Rhode Island) die Entstehung von ▷

Ein starker Jahrgang …

… ist die CD-ROM 2006 von **Spektrum der Wissenschaft.** Sie bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das spektrumdirekt-Archiv mit über 10 000 Artikeln. **spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland).

Bestellen können Sie über den Beihefter oder unter:

www.spektrum.de/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com

Spektrum der Wissenschaft Wissen aus erster Hand

▷ Laserlicht in nanostrukturiertem Silizium beobachtet, allerdings bei einer für normale Zwecke allzu tiefen Temperatur von minus 230 Grad Celsius (siehe Bild auf der Seite gegenüber). Die Forscher erzeugten auf einem dünnen Siliziumfilm winzige Löcher im Abstand von nur 110 Nanometern und pumpten sie dann optisch. Die daraufhin beobachtete Emission von Laserlicht führt Xu auf Elektronen zurück, die in natürlichen Gitterdefekten auf den Kristallflächen der Silizium-Nanostrukturen lokalisiert sind. Die enge Lokalisierung der Elektronen bewirkt quantenmechanische Impulsunschärfe, die wiederum die Strahlungsverstärkung fördert.

Diese Strukturen eröffnen faszinierende Möglichkeiten für den Bau nanometergroßer Siliziumlaser, die das erzeugte Licht obendrein mit raffinierten Spiegeln und Filtern aus demselben Material manipulieren. Solche Bauelemente könnten sich für künftige Kommunikationsnetze als nützlich erweisen (siehe »Halbleiter für Lichtstrahlen« von Eli Yablonovitch, Spektrum der Wissenschaft 4/2002, S. 66).

Das Pumpen von Elektronen ins obere Energieband eines Halbleiterkristalls ist nicht die einzige Methode der Lichtverstärkung. Wenn man zum Beispiel den Gitterschwingungen – Phononen – in einem kristallinen Halbleiter Energie zuführt, kann ein schwacher Lichtstrahl auf seinem Weg durch das Gitter diese Energie aufnehmen und sich dadurch verstärken. Leitet man einen Teil des verstärkten Lichts wieder in den Kristall zurück, entsteht ein Laser.

Starker Raman-Effekt

2002 und 2003 zeigte meine Arbeitsgruppe an der Universität von Kalifornien in Los Angeles, unterstützt von der US-Militärforschungsbehörde *(Defense Advanced Research Projects Agency)*, dass ein Siliziumchip auf diese Weise Licht zu erzeugen und zu verstärken vermag. Im Jahr darauf stellten wir unseren ersten Siliziumlaser her. Wie Maimans Laser wurde unser Gerät optisch gepumpt – in der Regel kein sehr wirksamer Prozess. Doch überraschenderweise wandelte unser Siliziumapparat die Pumpenergie fast ebenso effizient in Licht um wie ein herkömmlicher Laser. Kurz darauf bauten wir unseren Laser in eine Diode ein und konnten ihn nun elektrisch ein- und ausschalten.

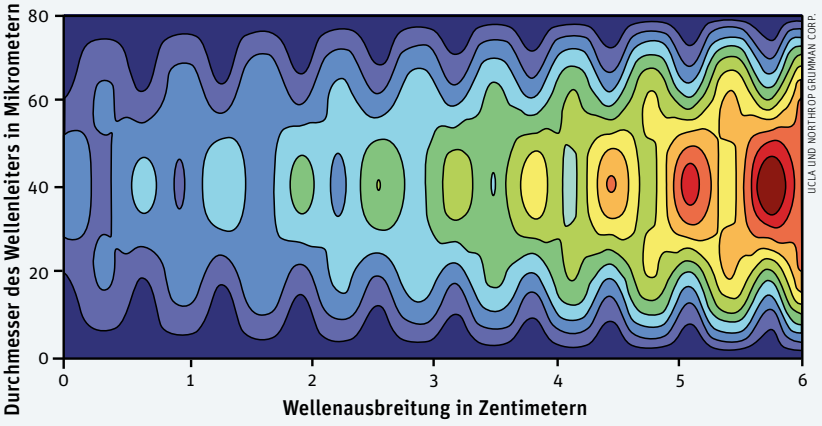
Wissenschaftler bezeichnen die Wechselwirkung zwischen Licht und Phononen als Raman-Effekt. Er wurde in den 1960er und 1970er Jahren oft genutzt, um die physikalischen Eigenschaften von Silizium und vielen anderen Materialien zu erforschen. Später verwendeten Techniker den Effekt in Glasfasern als Verstärker und Laser. Da für diesen Zweck kilometerlange Fasern nötig sind, hielt man dies zunächst nicht für einen praktikablen Weg zum Siliziumlaserchip. Erst unser Team erkannte, dass der Raman-Effekt in Silizium zehntausendmal stärker sein kann als in optischen Glasfasern. Der Grund ist die wohl geordnete atomare Struktur des Siliziumkristalls – endlich eine natürliche Eigenschaft, die für ein Lasermedium günstig ist. Hingegen hält die zufällige atomare Anordnung im amorphen Glas optischer Fasern den Raman-Effekt klein.

Ein Raman-Laser muss optisch gepumpt werden. Dabei sollen möglichst wenige Elektronen ins obere Energieband des Siliziums gelangen, denn sie würden durch Freie-Träger-Absorption die Lichtemission behindern. Darum verwendeten wir Infrarotlicht mit 1500 Nanometer Wellenlänge. Somit blieb die Photonenenergie kleiner als die Bandlücke und reichte nicht aus, ein Elektron ins obere Band zu heben. Allerdings können gelegentlich zwei Photonen mit vereinter Energie ein Elektron dennoch ins obere Band stemmen. Obwohl solche gepumpten Elektronen recht selten vorkommen, entziehen sie dem System Energie.

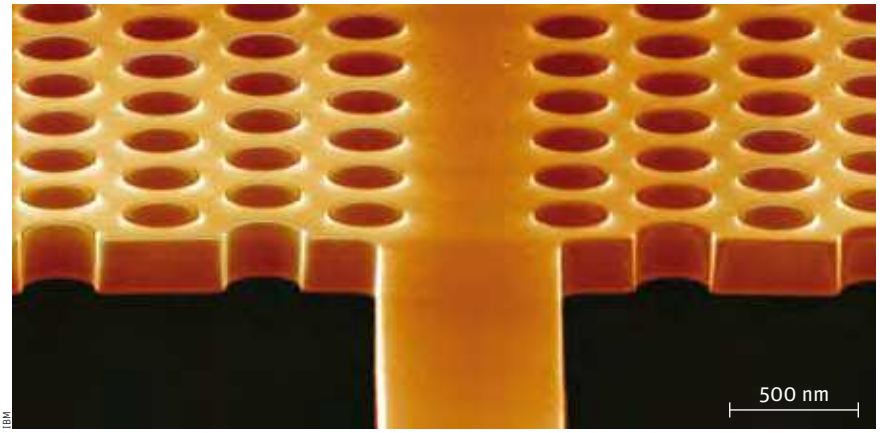
Nicht nur Raman-Laser leiden unter diesem Energieverlust. 2006 präsentierten Alexander Gaeta und Michal Lipson von der Cornell-Universität in Ithaca (New York) ein Gerät, das Licht durch Mischen mit einem intensiveren Lichtstrahl verstärkt. Dieser Verstärker und der daraus vielleicht künftig entstehende Laser verlieren ebenso Energie wie ein Raman-Lasersystem.

Um solche Verluste zu vermeiden, arbeitete unser erster Laser nicht kontinuierlich, sondern gepulst; dadurch konnten sich keine Elektronen ansammeln und dem System Energie entziehen. Für kontinuierlichen Laserbetrieb könnte eine benachbarte Diode ein elektrisches

Siliziumlaser als Bildverstärker



Hat eine optische Faser – ein Wellenleiter – einen Querschnitt, der viel größer ist als die Wellenlänge des einfallenden Lichts, so wird jedes vom Licht abgebildete Muster unterwegs durch Interferenz der an den Wänden reflektierten Lichtwellen abwechselnd scharf und unscharf. Dieser Effekt lässt sich nutzen, ein Bild gleichzeitig zu fokussieren und zu verstärken, während sich das Licht durch den Wellenleiter fortpflanzt (wärmere Farben rechts). Forscher an der Universität von Kalifornien in Los Angeles entwickeln derzeit gemeinsam mit der Firma Northrop Grumman ein Gerät, in dem der Raman-Effekt – die Wechselwirkung von Photonen und Phononen – ein optisches Bild verstärkt, während es durch einen dicken Siliziumwellenleiter wandert. Dieser Bildverstärker soll die Empfindlichkeit von Fernerkundungs- und Abbildungssystemen auf Laserbasis verbessern, die von Wissenschaftlern zur Umweltüberwachung benutzt werden.



IBM

Aus einer ähnlichen Siliziumschicht wie hier abgebildet fabrizierte das Team um James Xu an der Brown-Universität einen Tieftemperatur-Laser. Die Oberfläche des Geräts hat winzige Löcher in nur 110 Nanometer Abstand. Für den Lasereffekt sorgen Elektronen, die durch Quanteneinschluss auf den Siliziumflächen eng lokalisiert sind und dadurch ungenau definierte Impulse tragen.

Feld erzeugen, das vagabundierende Elektronen wegfegt. Dieses Verfahren haben Forscher an der Chinesischen Universität von Hongkong vorgeschlagen, und Haisheng Rong und sein Team bei der Firma Intel haben es 2005 praktisch demonstriert. Nach neueren Untersuchungen ist diese Methode allerdings nur teilweise wirksam, denn das Tempo, mit dem die Elektronen entfernt werden können, wird durch deren Maximalgeschwindigkeit in Silizium auf ein Tausendstel der Lichtgeschwindigkeit beschränkt. Außerdem ist dafür viel elektrische Energie nötig.

Zum Glück kennen wir noch ein paar Tricks, um den Wirkungsgrad des Siliziumlasers zu verbessern: Wenn man das Silizium mit Protonen beschießt oder ihm kleine Mengen Platin hinzufügt, werden die Elektronen gezwungen, rasch ins untere Energieband zurückzukehren, statt durch Freie-Träger-Absorption die wenigen Photonen aufzusaugen.

Gewinn bringende Verluste

Diese Verfahren reduzieren zwar die Anzahl der Elektronen im oberen Band und hindern sie, Licht zu schlucken, aber das Verscheuchen der Elektronen löst das Problem nur zum Teil. Die Geräte verlieren dennoch Pumpenergie, wenn solche Elektronen unbeabsichtigt produziert werden. Mit einem Trick, der eigentlich aus der Solarzellenforschung stammt, zeigte mein Team 2006, dass Silizium-Raman-Laser durch Nutzen der entgangenen Pumpenergie elektrische Leistung erzeugen können. Elektronen, die durch die unbeabsichtigte Zwei-Photonen-Absorption entstehen, fließen durch das Silizium und erzeugen Strom. Wie wir feststellten, lässt sich der Elektronenfluss so steuern, dass die Leistungsaufnahme des Geräts – gegeben durch Strom mal Spannung – negativ wird; das heißt, es gibt tatsächlich elektrische Leistung ab. Die gesammelte elektrische Energie kann dann elektronische Schaltkreise, die auf demselben Chip sitzen, mit Strom versorgen.

Später wies meine Gruppe nach, dass das Problem überhaupt verschwindet, wenn man für das optische Pumpen eine Wellenlänge von mehr als 2300 Nanometern verwendet. Die resultierende Photonenenergie ist dann so gering, dass nicht einmal ein Photonenpaar mit vereinter Energie ein Elektron ins obere Band zu hieven vermag.

Wie wir herausfanden, wird Silizium ein ausgezeichnetes Lasermedium, vielleicht sogar eines der besten, wenn es mit Infrarot zwischen 2300 und 7000 Nanometern gepumpt wird; erst bei noch größeren Wellenlängen tauchen andere schädliche Effekte auf. Dieses Spektrum ist für gegenwärtige Halbleiterlaser unerreichbar, und darum verspricht der Siliziumlaser ganz neue Anwendungen. Von allen Lasermaterialien bietet Silizium eine der besten Kombinationen von hoher Wärmeleitfähigkeit – um unerwünschte Wärme loszuwerden – und Robustheit gegen optische Leistungsspitzen; dadurch ist es ein idealer Produzent superintensiver Laserstrahlen.

Wissenschaftler erproben auch einen viel versprechenden Hybridansatz: einen Laser, bei dem ein Stück Galliumarsenid oder Indiumphosphid auf ein Siliziumsubstrat aufgebracht wird. In der Regel halten die Siliziumforscher nichts von Hybridverfahren, weil das Hinzufügen von Fremdstoffen die elektrischen Eigenschaften des Siliziums verändert; darum gelten Zusatzstoffe als Verunreinigung. Doch kürzlich haben Teams an der Universität von Michigan in Ann Arbor sowie bei Intel und der Universität von Kalifornien in Santa Barbara damit ermutigende Resultate erzielt. Falls es gelingt, gewisse Probleme mit der Unverträglichkeit der Hybridkomponenten zu bändigen, wird diese Methode vielleicht schon bald einen kommerziell gangbaren Weg zu einem Laser auf Siliziumbasis weisen.

Das beharrliche Streben nach dem Siliziumlaser scheint sich endlich auszuzahlen, und die einschlägige Forschung beginnt, mit traditionellen Lasermedien in Konkurrenz zu treten. Dieser Fortschritt muss fast zwangsläufig zu einer Annäherung zwischen Elektronik und Photonik führen. Obwohl es für exakte Prognosen über die künftige Richtung dieser neuen Elektrophotonik noch zu früh ist, dürfen wir schon heute sagen: Sie wird unseren Alltag verändern. ◁

Bahram Jalali ist Professor für Elektrotechnik an der Henry Samueli School of Engineering and Applied Science der Universität von Kalifornien in Los Angeles. Außerdem ist er Kurator am California Science Center.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Rechnen mit Lichtgeschwindigkeit. Von W. Wayt Gibbs in: Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 94

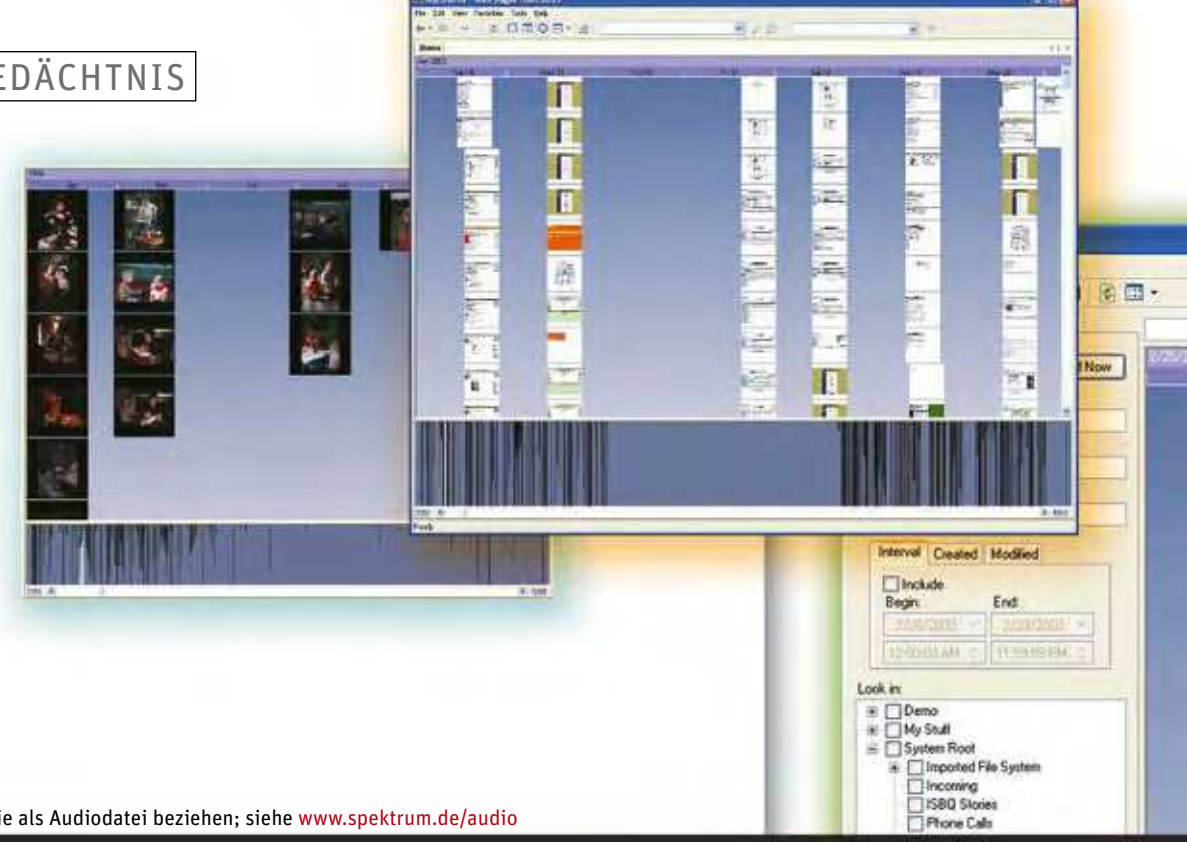
Silicon photonics: the state of the art. Von Graham Reed. John Wiley & Sons 2007

Optical interconnects: the silicon approach. Von L. Pavesi und G. Guillot (Hg.). Springer Series in Optical Sciences, Springer 2006

Optical gain and stimulated emission in periodic nanopatterned crystalline silicon. Von S. G. Cloutier, P. A. Kossyrev und J. Xu in: Nature Materials, Bd. 4, S. 887, 2005

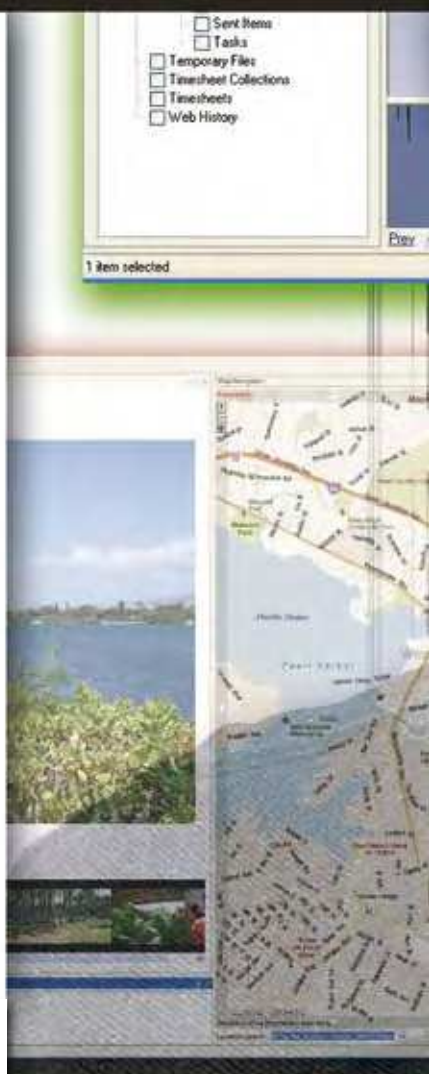
Demonstration of a silicon Raman laser. Von Ozdal Boyraz und Bahram Jalali in: Optics Express, Band 12, S. 5269, 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/869367.



Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Erinnerung total



Dank neuester Technik werden die Menschen alles aufzeichnen können, was sie sehen, hören, sagen und schreiben. All diese Daten sind in einem persönlichen digitalen Archiv verfügbar.

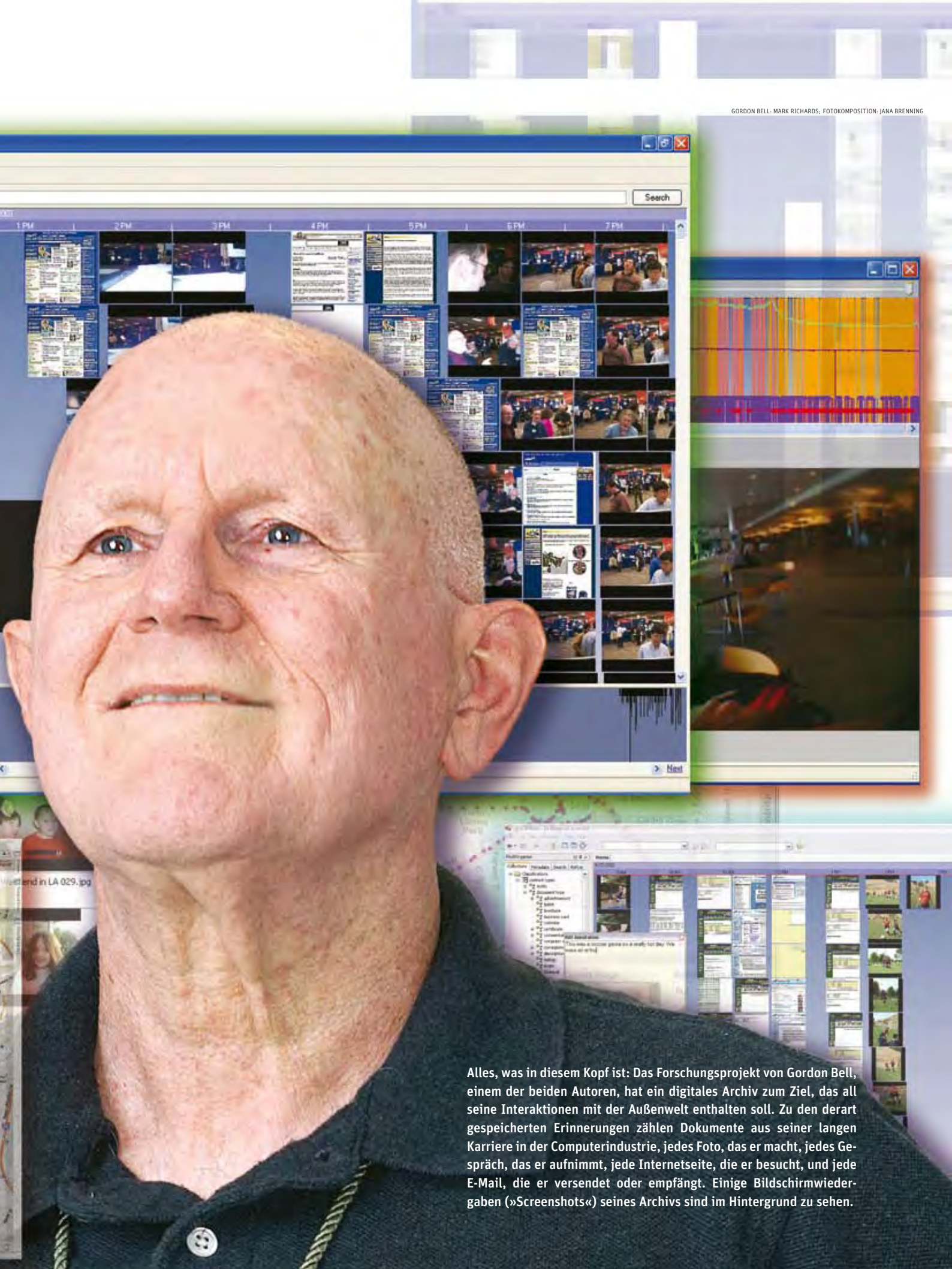
Von Gordon Bell und Jim Gemmell

Unser Gedächtnis ist oft nervtötend unzuverlässig. Wir stoßen jeden Tag an seine Grenzen, wenn uns die Telefonnummer eines Freundes, der Name eines Geschäftspartners oder der Titel eines Lieblingsbuchs nicht einfallen will. Wir alle haben Strategien gegen die Folgen unserer Vergesslichkeit entwickelt, vom guten alten Schmierzettel bis zum elektronischen Terminplaner, und trotzdem gehen uns immer wieder wichtige Informationen durch die Lappen.

Seit einiger Zeit arbeiten wir in einer Gruppe bei Microsoft Research an einem Pilotprojekt, das der Unvollkommenheit unseres Gedächtnisses radikal abhelfen soll: der totalen digitalen Aufzeichnung eines Menschenlebens. Unsere erste Versuchsperson ist einer von uns: Gordon Bell. Seit sechs Jahren unternehmen wir es, seine Kommunikation mit anderen Menschen sowie all seine Interaktion mit Maschinen aufzuzeichnen, außerdem alles, was er sieht und hört, sowie alle Internetseiten, die er aufsucht, und dies alles in einem persönlichen digitalen Archiv abzuspeichern, das einerseits leicht zu durchsuchen und andererseits sicher ist.

Die Aufzeichnung beschränkt sich nicht auf bewusst Erlebtes. Tragbare Sensoren messen Dinge, die der Mensch überhaupt nicht wahrnimmt, wie etwa den Sauerstoffgehalt im Blut oder die CO_2-Konzentration in der Atemluft. Ein Computer kann dann diese Daten auf gewisse Muster hin durchsuchen; so wäre zum Beispiel festzustellen, unter welchen Umweltbedingungen sich Asthma bei einem Kind verschlimmert oder ob die Daten des Herzschlags zusammen mit anderen physiologischen Größen Vor- ▷

GORDON BELL: MARK RICHARDS; FOTOKOMPOSITION: JANA BRENNING



Alles, was in diesem Kopf ist: Das Forschungsprojekt von Gordon Bell, einem der beiden Autoren, hat ein digitales Archiv zum Ziel, das all seine Interaktionen mit der Außenwelt enthalten soll. Zu den derart gespeicherten Erinnerungen zählen Dokumente aus seiner langen Karriere in der Computerindustrie, jedes Foto, das er macht, jedes Gespräch, das er aufnimmt, jede Internetseite, die er besucht, und jede E-Mail, die er versendet oder empfängt. Einige Bildschirmwiedergaben (»Screenshots«) seines Archivs sind im Hintergrund zu sehen.

Ein Tag im digitalen Leben

Ein Blick in den Alltag der fiktiven Familie Digital, die in gar nicht ferner Zukunft lebt, illustriert einige der zahlreichen Vorteile einer lebenslangen digitalen Speicherung.

Anne Digital ist Chemieprofessorin und benötigt einen wissenschaftlichen Artikel, nur leider fällt ihr der Name des Autors nicht ein. Sie erinnert sich aber daran, dass sie den Artikel im vergangenen Sommer gelesen hat, während sie gerade mit einem Studenten telefonierte. Sie lässt das System gezielt die Dokumente suchen, die sie sich während der Gespräche mit dem Studenten angesehen hat – das wurde damals automatisch mit aufgezeichnet –, und findet sofort den Artikel, den sie braucht.

David bringt seine siebenjährige Tochter Laura zum Arzt. Lauras Gesundheitsanalyseprogramm hat eine Untersuchung empfohlen, da sie in den letzten sechs Monaten weniger zugenommen hat als erwartet. (Ihre Badezimmerwaage erfasst täglich ihr Gewicht.) Der Arzt vermutet, dass es sich um eine Nebenwirkung von Lauras Asthmamittel handelt. Da sie in den letzten Monaten überhaupt keine Beschwerden beim Atmen hatte, schlägt er vor, die Medikamente für eine Weile abzusetzen.

David Digital, von Beruf Wertpapierhändler, lässt alles, was an einem Arbeitstag anfällt – Dokumente, E-Mails, Telefongespräche und besuchte Internetseiten – archivieren. Während er gerade eine E-Mail schreibt, weist ihn sein Zeitplanungsprogramm darauf hin, dass er zu viel Zeit für die Kommunikation mit einem unbedeutenden Kunden aufwendet. Darauf wendet er sich einem viel wichtigeren Konto zu. David lässt sich außerdem übersichtlich darstellen, wie sich die stressigen letzten zwei Tage voller anstrengender Besprechungen auf sein Gewicht, seine Herzfrequenz und seine Kalorienaufnahme ausgewirkt haben.

▷ boten eines Herzanfalls sind. In Gestalt dieser Sensoren läuft also ein permanentes medizinisches Früherkennungsprogramm. Ihr Arzt hätte Zugang zu Ihrer detaillierten und ständig aktuellen Krankenakte, und wenn Sie, wie üblich, auf die Frage »Wann ist dieses Symptom zum ersten Mal aufgetreten?« keine klare Antwort haben – im digitalen Archiv ist sie zu finden.

In unserem Forschungsprojekt »MyLifeBits« haben wir einige Hilfsmittel für ein solches lebenslanges digitales Archiv ausgearbeitet. Es gelingt uns inzwischen, ein Ereignis so lebensecht in Ton und Bild wiederzugeben, dass dies der persönliche Erinnerung so aufhilft wie das Internet der wissenschaftlichen Recherche. Zu jedem Wort, das der Besitzer des Archivs irgendwann – in einer E-Mail, in einem elektronischen Dokument oder auf einer Internetseite – gelesen hat, findet er mit ein paar Tastendrücken den Kontext. Der Computer führt eine Statistik über die Beschäftigungen seines Besitzers und macht ihn beizeiten darauf aufmerksam, dass er sich für die wichtigen Dinge des Lebens nicht genügend Zeit nimmt. Er kann auch die räumliche Position seines Herrn in regelmäßigen Zeitabständen festhalten und damit ein komplettes Bewegungsbild erstellen. Aber vielleicht das Wichtigste: Das Leben eines Menschen wird der Nachwelt, insbeson-

In Kürze

- Weil das menschliche Gedächtnis fehlbar ist, arbeiten Forscher an einem System, das persönliche Kommunikation, Dokumente, Bilder und Videos automatisch aufzeichnet und alles in einem **durchsuchbaren Archiv** bereithält.
- Aufzeichnen und Abspeichern werden durch den rasanten Fortschritt in Sensor- und Speichertechnologie immer einfacher und billiger. Das größere Problem ist die **Entwicklung von Software**, die diese Daten organisiert und auffindbar macht.
- **Digitale Gedächtnisse** werden große Vorteile in der medizinischen Versorgung, der Arbeitsproduktivität und anderen Bereichen mit sich bringen, aber die Entwickler müssen dafür Sorge tragen, dass die **Archive sicher** sind.

Beim Abendessen streiten sich David und Anne mit ihrem 14-jährigen Sohn Stefan. Anne ärgert sich darüber, dass Stefan seine Hausaufgaben immer erst in allerletzter Minute erledigt, und besteht darauf, dass er sich auf der Stelle an seinen Aufsatz macht. Stefan zeigt seinen Eltern aber die Auswertungen seines Lernanalyseprogramms, die zeigen, dass seine Noten sich durch die späte Arbeit nicht verschlechtert haben. Sein digitaler Speicher lässt obendrein erkennen, dass er eher ein auditiver Lerntyp ist und mehr von Gesprächen in der Gruppe profitiert als durch Lesen.

Annes Mutter Johanna ist Rentnerin und wohnt in einem Heim für betreutes Wohnen. Das Hauspersonal hat Zugang zu Teilen ihres digitalen Speichers und wird automatisch benachrichtigt, wenn Herzschlag oder Atmung Unregelmäßigkeiten aufweisen oder wenn ihre tragbaren Geräte anzeigen, dass sie ihre üblichen Spaziergänge ausfallen lässt. Anne beobachtet inzwischen regelmäßig das digitale Protokoll der Spülmaschine; denn wenn ihre Mutter sich nicht gut fühlt, merkt man das daran, dass sie den Abwasch vernachlässigt. Abends vor dem Einschlafen unternimmt Johanna einen ausgedehnten Spaziergang durch ihre Erinnerungen: Ihr interaktiver Bildschirms zeigt ihr Fotos und Videos aus ihrem digitalen Archiv.

dere seinen Kindern und Enkeln, so genau, so lebhaft und mit allen Einzelheiten überliefert, wie es bisher den Reichen und Berühmten vorbehalten war.

Ein Netz von Pfaden

Ein früher Traum von einem maschinell erweiterten Gedächtnis wurde gegen Ende des Zweiten Weltkriegs von Vannevar Bush geäußert. Bush, damals Direktor des Office of Scientific Research and Development (OSRD), das die militärischen Forschungsprogramme der USA koordinierte, und besser bekannt als Erfinder des Analogrechners, stellte 1945 in seinem Aufsatz »As we may think« eine fiktive Maschine namens Memex (*Memory Extender*, »Gedächtnis-Erweiterer«) vor, die alle Bücher, alle Aufzeichnungen und die gesamte Kommunikation eines Menschen auf Mikrofilm speichern sollte. Das Memex sollte in einem Schreibtisch eingebaut sein und über eine Tastatur, ein Mikrofon und mehrere Bildschirme verfügen. Bush hatte vorgesehen, dass der Benutzer am Schreibtisch mit einer Kamera Fotografien und Dokumente auf Mikrofilm ablichtete oder neue Dokumente erstellte, indem er auf einen berührungsempfindlichen Bildschirm schrieb. Unterwegs sollte eine per Stirnband am Kopf befestigte Kamera das Aufzeichnen übernehmen. Vor allem aber sollte das Memex ähnlich dem menschlichen Gehirn zu assoziativem Denken fähig sein. Bush beschreibt das sehr plastisch: »Kaum hat es einen Begriff erfasst, schon springt es zum nächsten, geleitet von Gedankenassoziationen und entlang einem komplexen Netz von Pfaden, das sich durch die Gehirnzellen zieht.«

Im Lauf des folgenden halben Jahrhunderts entwickelten unerschrockene Informatikpioniere, unter ihnen Ted Nelson und Douglas Engelbart, einige dieser Ideen, und die Erfinder des World Wide Web setzten Bushs »Netz von Pfaden« in die Netzstruktur ihrer verlinkten Seiten um. Das Memex selbst blieb jedoch technisch außer Reichweite. Erst in den letzten Jahren haben die rasanten Fortschritte in Speichertechnik, Sensorik und Rechentechnologie den Weg für neue Aufzeichnungs- und Suchtechniken geebnet, die im Endeffekt weit über Bushs Vision hinausgehen könnten.

Das jüngste Wachstum der digitalen Speicherkapazitäten ist atemberaubend: Eine Festplatte für 500 Euro bietet heute bereits Platz für 1 Terabyte Daten. Das sind 1000 Gigabyte oder eine Billion (10^{12}) Bytes, ausreichend für die komplette Lektüre eines Lebens – Bücher, Aufsätze, E-Mail und Webseiten –, eine ausgedehnte Sammlung an Musik-CDs sowie für die nächsten 60 Jahre täglich ▷

MARK RICHARDS

Die SenseCam, die Bell um den Hals trägt, macht automatisch Bilder, wenn ihre Sensoren registrieren, dass sich die Lichtverhältnisse ändern oder andere Personen in der Nähe sind. Ein GPS-Gerät verzeichnet permanent Bells Aufenthaltsort. So kommt ein nach Zeit und Ort aufgeschlüsseltes Bildprotokoll eines Tages zu Stande.

▷ acht Stunden Sprache sowie zehn Fotos (Grafik S. 90). Wenn die Entwicklung so weitergeht wie bisher, passt dieselbe Menge an Informationen in zehn Jahren bereits auf die Speicherkarte eines Handys. Das wiederum ist drahtlos mit dem 4-Terabyte-Laufwerk des Computers zu Hause verbunden, das weniger als 100 Euro kosten wird. In 20 Jahren bekommt man für 500 Euro wahrscheinlich schon 250 Terabyte Speicherplatz – genug für mehrere zehntausend Stunden Videoaufnahmen und viele Millionen Fotos. Damit dürfte der Aufzeichnungsbedarf eines einzelnen Menschen für mehr als hundert Jahre gedeckt sein.

Gleichzeitig entwickelt die Industrie eine neue Generation von preiswerten Sensoren, die bald schon allgegenwärtig sein werden. Manche erfassen eine Vielzahl von Informationen über den Gesundheitszustand ihres Trägers sowie seine körperlichen Bewegungen, andere messen Temperatur, Feuchtigkeit, Luftdruck und Lichtverhältnisse in der Umgebung. Wärmesensoren bemerken sogar, ob sich ein weiterer Mensch in der Nähe befindet. Einige dieser Geräte wird man am Körper tragen, andere werden im Zimmer aufgestellt oder in Haushaltsgeräte eingebaut. So könnte ein Sensor im Kühlschrank die Essgewohnheiten seines Besitzers daraus erschließen, wann und wie oft die Tür geöffnet wird. Inzwischen sind Mikrofone und Kameras so billig, dass sie praktisch überall eingebaut werden können. In Mobiltelefonen gehört eine Kamera heute schon zur Standardausstattung, Schallaufzeichnungen werden bald folgen.

Schließlich gibt es dank der drastischen Leistungssteigerung in den letzten zehn Jahren Rechner, die enorme Mengen von Information effizient durchsuchen, auswerten und darstellen können. Mit einem gewöhnlichen Laptop kann man heute Datenbanken verwalten, die leistungsfähiger sind als die einer Großbank in den 1980er Jahren und fast hundertmal so groß. Mit einem Handy der Mittelklasse kann man im Internet surfen und Videos abspielen, und es verfügt womöglich bereits über Software zur Spracherkennung.

Daraufhin sind schon jetzt persönliche elektronische Tagebücher in Mode gekommen. Preiswerte Digitalkameras hoher Qualität – einschließlich derer, die in Mobiltelefonen eingebaut sind – haben einen wahren Fotografierboom ausgelöst. Persönliche Homepages werden zunehmend von bilderreichen Internet-Tagebüchern (so genannten Blogs) abgelöst. Speziell junge Leute machen regen Gebrauch von Blogs und mobilen Aufzeichnungsgeräten. Da sich das digitale Aufzeichnen trotz der gegenwärtigen, noch bescheidenen Möglichkeiten derartiger Beliebtheit erfreut, erfüllt es offensichtlich ein weit verbreitetes Bedürfnis; es wird sicherlich noch weiter zunehmen, sowie die Technik einfacher, umfassender und preiswerter wird.

Ratlos vor dem Datenberg

Unsere eigenen Erfahrungen begannen 1998, als Bell beschloss, ab sofort zum papierlosen Leben überzugehen und sich seines gigantischen Haufens von Artikeln, Büchern, Karten, Briefen, Notizzetteln, Postern und Fotos zu entledigen. Zu diesem Zweck mussten sämtliche Dokumente und Gegenstände seines Privatlebens und seiner langen Karriere in der Computerindustrie digitalisiert werden, bis hin zu selbst gedrehten Videos, Tonaufnahmen seiner Vorträge und den Aufzeichnungen seines Anrufbeantworters. Ball machte selbst vor den Aufdru-

MICROSOFT RESEARCH

cken auf seinen Kaffeetassen und T-Shirts nicht halt. Inzwischen hat er die Papierlosigkeit erreicht, wenn auch zu einem stolzen Preis: Ein persönlicher Assistent war mehrere Jahre lang mit nichts anderem beschäftigt, als all die alten Papiere aufzuarbeiten. Neueres Material einzufügen war nicht mehr so mühsam, weil diese Dokumente, Bilder und Videos zum großen Teil bereits in digitaler Form vorlagen.

Nach der großen Einscan-Aktion kam die große Frustration. Mit der damals zur Verfügung stehenden Software war mit dem schönen großen Datenberg nicht viel anzufangen. Das war der Auslöser des Projekts »MyLifeBits«.

Als wir im Jahr 2001 begannen, waren die Suchmaschinen für Desktop-PCs noch sehr unhandlich. Wir entwarfen eine Datenbank, die nicht nur die Möglichkeit zur Volltextsuche innerhalb unserer PCs bietet (was inzwischen schon zur Standardausstattung gehört), sondern digitalisierte Erinnerungen auch über Zusatzinformationen auffindet, beispielsweise Datum, Ort und Gegenstand eines Fotos oder schriftliche oder gesprochene Kommentare, die der Datei beigefügt sind. Diese Metadaten sind häufig entscheidend; so findet man vielleicht eine bestimmte E-Mail nur wieder, weil man weiß, dass man sie irgendwann im Frühjahr verschickt hat. Durch geschicktes Verknüpfen der Metadaten – die zum Großteil automatisch eingetragen werden – mit den digitalen Erinnerungen kann die Datenbank selbst die größten Archive effizient und mit Aussicht auf Erfolg durchkämmen.

An Ferien mit der Familie erinnert man sich besser, wenn diese digital aufgezeichnet und archiviert werden. Schnappschüsse aus dem Urlaub werden in diesem Tagebuch eines Ausflugs nach Los Angeles, den Jim Gemmell (einer der Autoren) mit seinen Kindern unternommen hat, mit den aufgezeichneten GPS-Daten (die Punkte in der Karte) verknüpft.

MyLifeBits hat Bell außerdem mit einer Reihe von neuartigen Geräten ausgestattet, die Kommunikation und Interaktion mit anderen Menschen und mit Maschinen erfassen. Das System zeichnet seine Telefongespräche auf sowie die Radio- und Fernsehprogramme, die er konsumiert. Arbeitet er am Computer, speichert MyLifeBits automatisch eine Kopie jeder Internetseite, die er besucht, und jeder E-Mail, die er sendet oder empfängt. Es speichert alle Dateien, die er öffnet, die Musik, die er sich anhört, und alle Suchanfragen, die er durchführt. Das System führt sogar Proto- ▷

WISSEN
WAS HEUTE WICHTIG IST

Die Redaktion von spektrumdirekt informiert Sie schnell, fundiert und verständlich über den Stand der Forschung.

www.spektrumdirekt.de/heute

spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

koll darüber, welche Fenster sich gerade im Bildschirmvordergrund befinden, und schreibt alle Mausbewegungen und Tastaturanschläge mit. Wenn Bell unterwegs ist, erfasst MyLifeBits mittels eines tragbaren GPS-Systems permanent seinen Aufenthaltsort und überträgt die Informationen per Funk in sein Archiv. Damit kann die Software den Fotos, die Bell macht, anhand des Aufnahmezeitpunkts automatisch den Ort zuordnen.

Für das visuelle Protokoll eines Tages trägt Bell die SenseCam, eine Kamera, die von Microsoft Research entwickelt wurde und die automatisch auslöst, wenn ihre Sensoren ein Indiz dafür registrieren, dass der Besitzer an einem Foto interessiert sein könnte. Erfasst etwa der Infrarotsensor der SenseCam eine Wärmequelle in der Nähe, fotografiert die Kamera die zugehörige Person. Ändern sich die Lichtverhältnisse erheblich – ein Zeichen dafür, dass der Besitzer gerade einen Raum betreten oder verlassen hat –, macht die Kamera ebenfalls ein Bild.

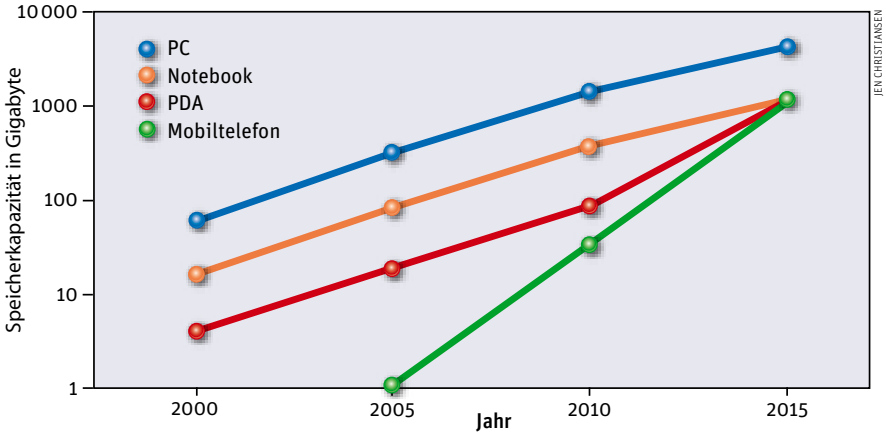
Eine aktuelle Studie am Addenbrooke-Krankenhaus in Cambridge (Großbritannien) hat ergeben, dass ein Patient mit Gedächtnisstörung, der sich jeden Abend noch einmal die Bilder seiner SenseCam angesehen hatte, Erinnerungen über einen Zeitraum von mehr als zwei Monaten bewahren konnte. Im Gegensatz dazu verbesserte das allabendliche Durchlesen eines geschriebenen Tagebuchs die Gedächtnisleistung kaum. Der Neuropsychologe Martin Conway von der Universität Leeds prophezeit gar, dass die SenseCam »die erste wirklich wirksame Erinnerungshilfe des 21. Jahrhunderts« werden könnte.

Sehr persönliche Computer

In den vergangenen sechs Jahren haben sich in Bells digitalem Archiv über 300 000 Aufzeichnungen angesammelt. Sie belegen ungefähr 150 Gigabyte auf den Festplatten seines Laptops sowie auf dem Desktop-PC seines Assistenten; es gibt lokale und externe Sicherungskopien. Den Löwenanteil des Speicherplatzes (mehr als 60 Gigabyte) nehmen Videodateien ein, es folgen Bilder mit 25 Gigabyte und Audiodateien (zum Großteil Musik) mit 18 Gigabyte. Der Rest verteilt sich auf 100 000 Internetseiten, 100 000 E-Mails, 15 000 Textdateien, 2000 PowerPoint-Dateien (für Vorträge) und anderes. Bell empfindet das System vor allem dann als nützlich, wenn er alte Bekannte oder allgemein Kommunikationspartner ausfindig machen muss. Mit seiner Hilfe hat er auch schon Internetseiten für Zitate in seinen wissenschaftlichen Arbeiten, die medizinischen Unterlagen seiner Bypassoperation vor 25 Jahren und ein Foto eines verstorbenen Freundes für einen Nachruf in der Zeitung herbeigeschafft.

Einige Merkmale von MyLifeBits, wie die Volltextsuche, sind bereits in handelsübliche Produkte integriert worden. Diesen ist MyLifeBits zwar weit voraus, aber gleichwohl verbesserungsbedürftig. Bessere Spracherkennungssoftware würde das System enorm voranbringen, da es dann Telefon- und andere Gespräche in durchsuchbaren Text verwandeln könnte. Eine automatische Gesichtserkennung würde einem die Zeit raubende Arbeit ersparen, zu jedem Foto die Namen der Abgebildeten zu notieren. Und das Wiederfinden von Informationen würde sich erheblich vereinfachen, wenn das System seine Dokumente in mehrere hundert Klassen einteilen könnte, indem es deren Form und Inhalt analysiert.

Bereits jetzt allerdings hat unser Forschungsprojekt die Entwicklung des PCs in eine spezielle Richtung maßgeblich vorangetrieben: von einem reinen Textverarbeitungssystem und Rechenknecht zu einem Arbeitsgerät, welches alles im Leben des Benutzers in bester Multimediaqualität festhält. Viele Experten haben den Niedergang des PCs prophezeit, aber es ist klar, dass das P (wie persönlich) im PC nicht verschwinden wird, im Gegenteil: Die PCs werden eher noch persönlicher werden. Was sich aber ändern wird, ist das C wie Computer. Unsere Geräte werden sich zu riesigen rechnenden Sys-



Datensorte	Durchschnittsgröße in Byte	Stückzahl pro Tag	Speicherbedarf pro Jahr in Gigabyte	Speicherbedarf für 60 Jahre in Gigabyte
Bücher und Aufsätze	1 000 000	1	0,4	21,9
E-Mails	5 000	100	0,2	11,0
eingescannte Papierseiten	100 000	5	0,2	11,0
Internetseiten	50 000	100	1,8	109,5
Tonaufzeichnungen (MP3)	4 000 000	1	1,5	87,6
Sprachaufnahmen	1000 pro Sekunde	8 Stunden	10,5	630,7
Fotos (JPEG)	1 000 000	10	3,7	219,0
zusammen			18,3	1090,7

Die Speicherkapazitäten sind in den letzten Jahren enorm gewachsen, und dieser Trend wird weitergehen (oben). Ein gewöhnlicher Desktop-PC wird bis im Jahr 2010 mehr als ein Terabyte (10^{12} Byte) an Daten fassen; Laptops, PDAs und Mobiltelefone werden diesen Meilenstein wohl im Jahr 2015 erreichen. Ein Terabyte Speicherplatz reicht aus, um sämtliche Bücher, E-Mails, Sprachaufzeichnungen, Musikdateien und Fotos zu speichern, die ein Mensch in 60 Jahren ansammelt (Tabelle).

temen entwickeln, die nicht nur die bisherigen Computer umfassen, sondern auch Speicherdienste im Internet, neue Zugangsgeräte (wie etwa Mobiltelefone und Unterhaltungselektronik) und die bald allgegenwärtigen Sensoren. Wahrscheinlich wird unser MyLifeBits im Endeffekt in einem fest in der Wohnung installierten Server untergebracht sein, der wiederum mit zahlreichen Internetdiensten verbunden ist.

Ein Traum wird wahr

Um die möglichen Auswirkungen des digitalen Gedächtnisses zu illustrieren, haben wir ausgemalt, wie ein Tag im Leben einer Familie aussehen könnte, die – in gar nicht ferner Zukunft – vollen Gebrauch von dieser Technik macht (Kasten S. 86/87). Die digitalisierten Erinnerungen der Familienmitglieder sind zum Teil in ihren persönlichen Mobiltelefonen, Laptops und Computern gespeichert und werden zugleich über eine sichere Internetverbindung zu einem Server übertragen, den eine hypothetische Firma namens LifeBits betreibt. Diese Firma übernimmt die Aufbewahrung der Daten, erstellt Sicherungskopien (etwa um versehentlich gelöschtes Material wiederherstellen zu können) und legt Kopien des Archivs an verschiedenen Orten ab, um zu verhindern, dass die Daten durch Brand, Sabotage oder technische Defekte verloren gehen.

Da die meisten ihrer Informationen über eine sichere Internetverbindung zugänglich sind, können die Familienmitglieder sie überall und zu jeder Zeit abrufen. Besonders heikle Informationen, die jemanden in juristische Schwierigkeiten bringen könnten, kann man im Ausland aufbewahren, sozusagen in einer Schweizer Bank für Daten, wo sie vor einem gerichtlichen Durchsuchungsbeschluss sicher sind. Die Kinder der Familie können ihre Aufzeichnungen verschlüsseln, aber LifeBits wird den Eltern im Notfall Zugang zu den Daten verschaffen. Vielleicht steht in den Arbeitsverträgen der Eltern, dass alle ihre dienstlichen Aufzeichnungen Eigentum des Arbeitgebers sind. Bei einer Kündigung müssen sie sich dann womöglich den Teil ihres digitalen Gedächtnisses »amputieren« lassen, der als Firmeneigentum gilt.

Dieses Szenario ist gar nicht so futuristisch, wie es auf den ersten Blick aussieht. Tragbare Geräte mit Sensoren, die Daten zum Gesundheitszustand sammeln und Lebenszeichen wie Herz- und Atemfrequenz oder den Kalorienverbrauch überwachen, sind bereits auf dem Markt. Die Firma Dust Networks in Hayward (Kalifornien) hat ein Kommunikationsnetz für Sensoren nach dem Vorbild der »motes« (Spektrum der Wissenschaft 10/2004, S. 86) entwickelt. Das Projekt »Human Speechome«, das von Deb Roy am Media Lab des Massachusetts Institute of Technology durchgeführt wird, hat es sich zur Aufgabe gemacht, in den ersten drei Lebensjahren eines Kindes – es handelt sich dabei um Roys Sohn, der zurzeit ein Jahr alt ist – nahezu jede seiner wachen Stunden aufzuzeichnen, um an diesem Beispiel den Spracherwerb des Menschen im Detail zu studieren. Kiyoharu Aizawa und seine Kollegen an der Universität Tokio arbeiten an einer tragbaren Videokamera, die sich immer dann einschaltet, wenn die Alphawellen im Gehirn des Trägers darauf schließen lassen, dass etwas Interessantes im Blickfeld ist.

Microsoft Research unterstützt zur Zeit 14 Universitäten, die eine Vielzahl von Forschungsprojekten zum digitalen Gedächtnis durchführen. So stellt sich das Projekt MyHealthBits unter Leitung von Bambang Parmanto an der Universität Pittsburgh der Herausforderung, riesige Mengen von Gesundheitsdaten aufzuzeichnen und die entstehenden Datenberge zu verwalten. Studien an der Universität des Bundesstaats Washington haben die Vorzüge einer permanenten Gesundheitsüberwachung bei Diabetespatienten und bei Menschen mit Schlafstörungen belegt.

Dieser rasche Fortschritt ist ermutigend, aber das Zeitalter des digitalen Gedächtnisses wird nicht ohne Probleme anbrechen. Das Aufzeichnen von Gesprächen sowie das Fotografieren von Personen unterliegt in einigen Ländern und US-Bundesstaaten zurzeit Beschränkungen. Viele Menschen befürchten, dass solche Aufnahmen vor Gericht gegen sie verwendet werden könnten. Zweifellos wären digitale Aufzeichnungen ein wesentlich besseres Beweismittel als die menschliche Erinnerung. Richard Nixon gab bekanntlich seinen Beratern, die vor Gericht als Zeugen aussagen sollten, die Anweisung, sich mit »Ich kann mich nicht erinnern« herauszureden; aber schließlich wurden ihm Tonbandaufnahmen seiner eigenen Gespräche zum Verhängnis.

Nach einem ehernen Rechtsgrundsatz darf niemand gezwungen werden, sich vor Gericht selbst zu belasten. Bereits die Erstellung eines erschöpfenden digitalen Gedächtnisses könnte eine potenzielle Selbstbelastung sein. Die neuen Technologien können jedoch die durch sie selbst heraufbeschworenen Gefahren mindern helfen. So kann man die Bilder oder Äußerungen Unbeteiligter automatisch unkenntlich machen, um nicht gegen das Gesetz zu verstoßen.

Ein kritischer Punkt wird der Schutz der Privatsphäre sein. Die Aussicht, dass ▷

Tragbare Überwachungsgeräte, die permanent die Lebenszeichen eines Menschen aufzeichnen und archivieren, erlauben es, Krankheiten zu erkennen, bevor sie manifest werden. Das Armband SenseWear, das von der Firma BodyMedia aus Pittsburgh hergestellt wird, bestimmt durch Messen von Temperatur, Wärmeabgabe und elektrischem Widerstand der Haut den Energieumsatz eines Menschen.

BODYMEDIA INC., 2006

Skandalreporter, Kriminelle oder totalitäre Regime Zugang zu solch höchst persönlichen Aufzeichnungen erlangen könnten, ist beängstigend. Ein Gauner könnte sich mit solchen Informationen mühelos für deren legitimen Besitzer ausgeben.

Das Problem ist qualitativ nicht neu – quantitativ dagegen sehr. Schon heute können die Informationen, die der Durchschnittsnutzer auf seinem PC lagert, in den falschen Händen sehr viel Schaden anrichten. Und selbst wenn unsere Computer gegen vorsätzliche Angriffe so gut gesichert werden wie ein Panzerschrank, bleibt als größte Gefahr die Ungeschicklichkeit des Benutzers. Ein falscher Tastendruck, und die ganze Welt kann seine Krankenakte einsehen. Hier müssen die Benutzeroberflächen besser werden als alles, was wir derzeit haben, und eine intelligente Software muss uns warnen, sobald die Preisgabe von Daten bedenklich erscheint.

Es wird auch schwierig sein sicherzustellen, dass man noch nach Jahrzehnten Zugriff auf seine Aufzeichnungen hat. In der Vergangenheit sind schon mehrfach Daten unzugänglich geworden, weil deren Formate veraltet waren (Spektrum der Wissenschaft 9/1995, S. 66). Man wird immer wieder in die Verlegenheit kommen, seine Daten in die jeweils aktuellen Formate umwandeln zu lassen, oder sogar Imitationen alter Programme auf neueren Geräten laufen lassen müssen (Emulation), um die Daten verfügbar zu halten. Vermutlich wird eigens dafür eine kleine Branche entstehen.

Die größte Aufgabe aber besteht darin, den gigantischen Vorrat an Wissen durch geeignete Software zu nützlichen Zwecken anzuzapfen. Das höchste Ziel ist ein Gerät, das wie ein persönlicher Assistent die Wünsche des Anwenders vorausahnt. Zumindest müssen Verarbeitung und Sortierung der Daten besser bewältigt werden. Was für ein paar Bücherregale gut funktioniert, scheitert jämmerlich bei einer Sammlung von der Größe der Library of Congress. Und wir wollen nicht die Bibliothekare unserer eigenen digitalen Archive sein; das soll der Computer für uns erledigen.

Der aussichtsreichste Weg zu diesem Ziel scheint uns die Künstliche Intelligenz (KI) zu sein. Diese Meinung ist zwar umstritten; aber wir sind überzeugt, dass ein gutes KI-System durch die enorme Menge an Daten, die es verarbeitet, wesentlich bessere Leistungen erbringen kann als bisherige Systeme mit bescheidenerer Datenbasis. Bis jetzt haben wir eine Software entwickelt, die Dateien nach inhaltlichen Kriterien einordnen soll, aber es bleibt noch viel zu tun.

In einem gewissen Sinn wird das digitale Gedächtnis kommen, ob wir es wollen oder nicht. Auch seine Gegner werden in den nächsten Jahren ein Vielfaches des heutigen Speicherplatzes auf ihren Computern zur Verfügung haben und erwarten, dass die Software ihn nutzen hilft. Die Aussicht, dass jede Lebenssituation aufgezeichnet wird, mag einem Schauer über den Rücken jagen; aber das wird nach unserer Überzeugung durch den zu erwartenden Nutzen bei Weitem aufgewogen. Ärzte können in Zukunft bessere Behandlungen für Herzerkrankungen, Krebs und andere Krankheiten entwickeln, indem sie permanent den Gesundheitszustand ihrer Patienten überwachen. Wissenschaftler werden einen Einblick in die Denkprozesse ihrer Vorgänger erhaschen und Historiker werden die Vergangenheit mit nie da gewesener Genauigkeit untersuchen können. Die sich bietenden Möglichkeiten sind nur durch unsere mangelnde Vorstellungskraft beschränkt. ◁

Gordon Bell (oben) und **Jim Gemmell** arbeiten seit 2001 gemeinsam bei Microsoft Research am Projekt MyLifeBits. Bell, einer der Pioniere der Computerindustrie, betreute in den 1970er Jahren die Entwicklung des berühmten VAX-Minicomputers bei der Digital Equipment Corporation. In den 1980er Jahren setzte er sich in der Öffentlichkeit für das Ansehen der Informatik ein. Seit 1995 ist er Principal Researche« in der Arbeitsgruppe »eScience« bei Microsoft in San Francisco. Gemmell ist Senior Researcher in der Arbeitsgruppe »Next Media« bei Microsoft. Neben seinen hier beschriebenen Aktivitäten verfolgt er weitere innovative Projekte.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Digital memories in an era of ubiquitous computing and abundant storage. Von Mary Czerwinski et al. in: Communications of the ACM, Bd. 49, Nr. 1, S. 44, Januar 2006

MyLifeBits: a personal database for everything. Von Jim Gemmell, Gordon Bell und Roger Lueder in: Communications of the ACM, Bd. 49, Nr. 1, S. 88, Januar 2006

A personal digital store. Von Gordon Bell in: Communications of the ACM, Bd. 44, Nr. 1, S. 86, Januar 2001

As we may think. Von Vannevar Bush in: Atlantic Monthly, Bd. 176, Nr. 1, S. 101, Juli 1945

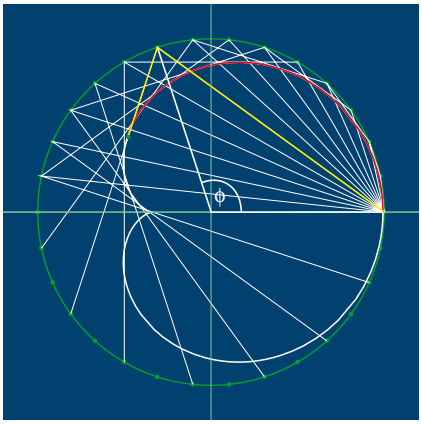
Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/869379.

EBENE KURVEN

Brennkurven und das Porzellan

Ob das Licht einem geraden oder einem fiktiven gekrümmten Weg folgt: Auf einer Kaustik läuft das auf dasselbe hinaus.

Von Norbert Treitz



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: NORBERT TREITZ

Für jeden Punkt der Kardioide gilt: Der Weg des Lichts von der punktförmigen Quelle rechts bis zum Berührpunkt mit der Kurve (gelb) ist genauso lang wie der Weg entlang der Kurve (rot), nämlich (8/3)sin(ϕ/2).

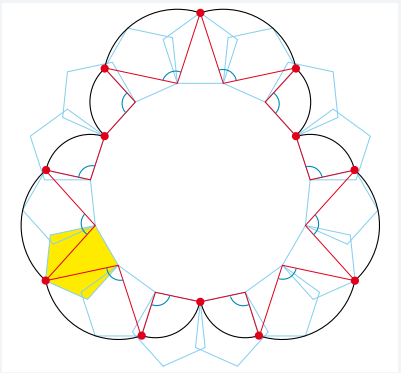
Vor zwei Monaten habe ich Ihnen an dieser Stelle Kaustiken (»Brennkurven«) vorgestellt: auffällig helle Kurven, die sich zum Beispiel auf der Oberfläche des Kaffees zeigen, wenn die Sonne kurz vor ihrem Untergang die Kaffeetasse bescheint. Die Kurve ist ihrerseits nur der Schnitt der Kaffeeoberfläche mit einer – gekrümmten – Fläche hoher Lichtintensität, wie sie stets auf der Innenseite einer beleuchteten, reflektierenden Fläche auftritt. Dass diese »Brennfläche« zu einem Punkt (dem »Brennpunkt«) zusammenschrumpft, ist genau betrachtet ein Ausnahmeereignis.

Falls die reflektierende Fläche einen kreisförmigen Querschnitt hat, zum Beispiel ein Stück Hohlkugel oder -zylinder ist, ergeben sich als zwei spezielle Kaustiken Herz- und Nierenkurven (Kardioiden und Nephroiden). Sie gehören zur größeren Kurvenklasse der Epizykloiden; im Aprilheft habe ich beschrieben, wie man diese ganz ohne Licht durch Räder, die aneinander abrollen, erzeugen kann.

Zwei völlig verschiedene physikalische Prozesse erzeugen also die gleichen Kurven. Im vorliegenden Beitrag soll es nun darum gehen, aus dieser Identität Nutzen zu ziehen. Insbesondere soll die Sache mit der Phasengleichheit, die ich im März für die beiden Brennpunkte einer Ellipse ausgeführt habe, auch für Epizykloiden geklärt werden. Kaustiken sind ja nicht etwa so hell, weil dort viele

Eine holprige Kurvenberechnung

Um die Länge einer Epizykloide zu berechnen, lassen wir zunächst nicht glatte Kreise, sondern regelmäßige Vielecke (gleicher Seitenlänge) aneinander abrollen und betrachten den Weg, den eine Ecke des beweglichen Vielecks nimmt. Für eine k-zählig symmetrische Epizykloide (mit der Ordnung $m = k+1$) rollt ein n-Eck außen auf einem $(k{\cdot}n)$-Eck ab. Im linken Bild ist $n = 5$ und $k = 3$; mit $n = 21$ (Bild rechts) ist das schon eine ziemlich runde Sache. Es handelt sich um kn Kreisbogenstücke (das Stück der Länge null, bei dem sich die betrachtete Ecke gar nicht bewegt, mitgezählt). Deren Mittelpunkt ist jeweils eine Ecke des festen Vielecks, der Radius eine »Diagonale« des beweglichen Vielecks (wobei unter »Diagonale« abweichend vom üblichen Sprachgebrauch jede Strecke von Ecke zu Ecke zu verstehen ist, einschließlich der Seite von einer Ecke zur Nachbarecke und der leeren Strecke von einer Ecke zu sich selbst). Für n gegen unendlich nähert sich dieser Weg einer Epizykloide.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: NORBERT TREITZ

NORBERT TREITZ

Der Drehwinkel jedes einzelnen Bogenstücks ist stets derselbe, nämlich gleich dem Vollwinkel 2π minus den Innenwinkeln $\pi - 2\pi/n$ und $\pi - 2\pi/(nk)$ der beiden Vielecke; das ergibt $2\pi(k+1)/(nk)$. Also ist die gesamte Länge der genäherten Epizykloide gleich diesem Winkel mal der Summe der beteiligten Radien, das ist $2\pi(k+1)$ mal dem Mittelwert d dieser Radien. Die »Diagonalen« im n-Eck nehmen alle Längen $2r \sin(j\pi/n)$ für j von 0 bis n an, wobei r der Umkreisradius ist.

Nun lassen wir n gegen unendlich gehen; dabei werden die beteiligten Vielecke immer vieleckiger und damit kreisähnlicher. Der Mittelwert d strebt (bis auf einen Skalierungsfaktor) gegen das Integral der Sinusfunktion von 0 bis π; es ergibt sich $d = 2/\pi$. Da der Umkreisradius R des festen Vielecks gleich kr ist, erhalten wir für die Gesamtlänge der Epizykloide den Wert $8R\,(k+1)/k$. Der Faktor π hat sich auf wundersame Weise herausgekürzt.

Diese Berechnung funktioniert in gleicher Weise auch für die Hypozykloide.

Lichtstrahlen zusammentreffen; das ist auf der Innenseite eines Hohlspiegels so ziemlich überall der Fall. Auch nicht, weil die reflektierten Lichtstrahlen sämtlich Tangenten an die Kaustik sind. Entscheidend ist vielmehr, dass das Licht entlang dieser Tangenten phasengleich eintrifft. Daher verstärken sich »infinitesimal benachbarte« Lichtwellen, statt einander auszulöschen.

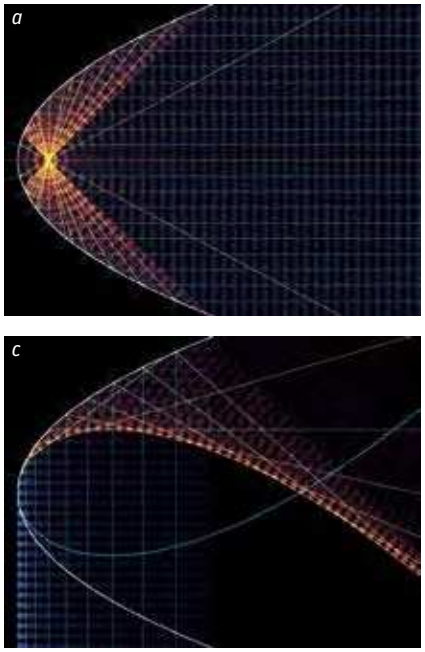
Für die Kardioide gilt sogar noch ein bisschen mehr. Der Weg, den ein Lichtstrahl von seinem Ausgangspunkt am Kreisrand über die Reflexion an demselben bis hin zum Berührpunkt mit der Kaustik zurücklegt, ist gleich dem gekrümmten Weg vom selben Ausgangspunkt die Kaustik entlang (Bild links)!

Berechnungen von Kurvenlängen sind im Allgemeinen eine unangenehme Sache. Man nehme das Integral über die Wurzel aus der Summe der Quadrate der Ableitungen der die Kurve beschreibenden Funktion; diese Formel für eine konkrete Kurve in einen handlichen algebraischen Ausdruck zu verwandeln erfordert die raffiniertesten Tricks und gelingt nicht immer. Da greift man gern zu unkonventionellen Argumentationen, die nur einen Einzelfall erledigen, den aber elegant. So kommt man bei der Epizykloide zum Ziel, indem man die schönen glatten Kreise durch holprige Vielecke approximiert (Kasten links).

Für die Kardioide löst sich durch die Erkenntnis, dass $1+\cos\phi = 2\cos^2\phi/2$ ist, das ganze Gestrüpp aus Integral und Wurzel in Wohlgefallen auf, sodass man die Gleichheit von gekrümmtem und geknickt geradem Weg mit der sperrigen Standardformel nachrechnen kann. Für die anderen Kaustiken wird die Gleichheit der Wege durch meine Computersimulationen bestätigt. (Ich bin Experimentalphysiker …)

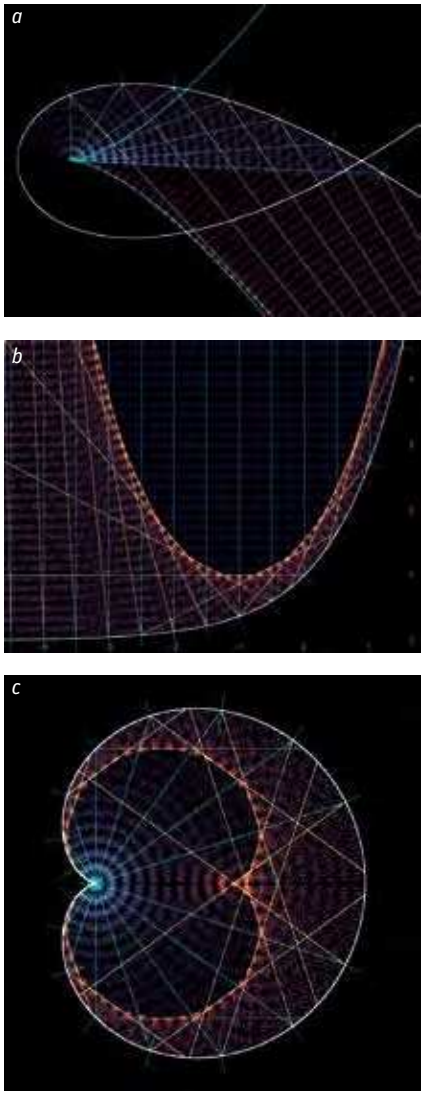
Tschirnhaus-Kubik

Wir kehren wieder zu Hohlspiegeln zurück und erinnern uns daran, dass das Rotationsparaboloid einen exakten Brennpunkt hat, der theoretisch nicht viel größer als eine Wellenlänge sein muss. Aber das ist der Ausnahmefall, bei dem das Licht genau achsenparallel einfällt. Schon wenn die Wellen auch nur etwas schräg einfallen, gibt es statt des Brennpunkts eine Kaustik, die sich um ihn herum legt und ihn dabei geflissentlich meidet, aber immerhin die Stelle ▷



ALLE ABBILDUNGEN DIESER SEITE: NORBERT TREITZ

Paralleles Licht erzeugt in einem parabelförmigen Spiegel (Paraboloid oder Zylinder mit dem gleichen Profil) je nach Einfallswinkel einen Brennpunkt *(a)* oder auch eine Kaustik *(b)*, die im Extremfall rechtwinklig zur Achse einfallenden Lichts die Hälfte einer Kubik von Tschirnhaus ergibt (*c*; die andere Hälfte ist hellblau ergänzt).



Die Kaustik einer (halben) Tschirnhaus-Kubik ist eine (halbe) Neil'sche Parabel, wobei die Lichtquelle im Mittelpunkt des Scheitelkrümmungskreises sitzt *(a)*. Aus der Kurve der Exponentialfunktion $y = \exp x$ mit parallelem Licht von oben wird die Kettenlinie $y = \cosh(x+1)$ *(b)*, aus einer Kardioide mit punktförmiger Lichtquelle an der Spitze eine Nephroide *(c)*, aus einer logarithmischen Spirale mit Lichtquelle im Mittelpunkt eine gedrehte Version ihrer selbst *(d)* und aus einer gewöhnlichen Zykloide mit Licht parallel von oben eine auf die Hälfte verkleinerte Version ihrer selbst *(e)*.

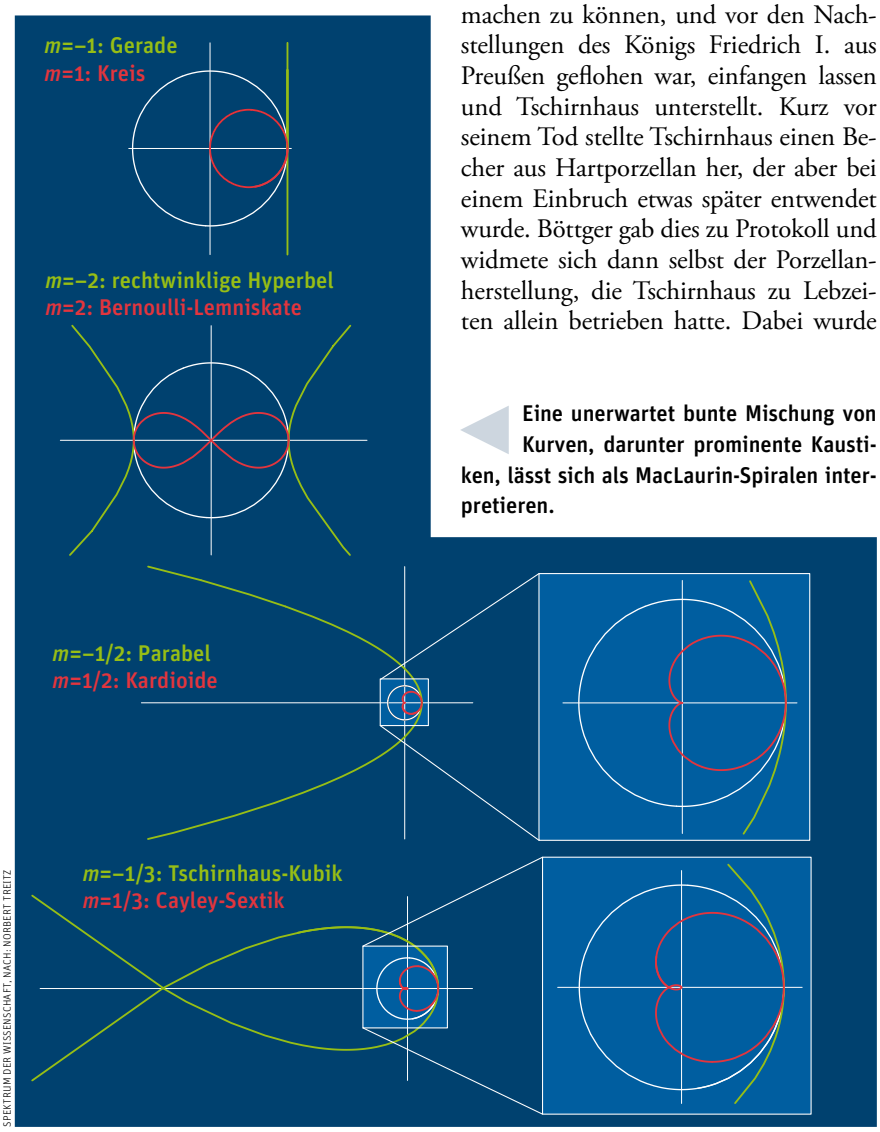
▷ unter ihm, an der man einen Bildpunkt erwarten würde, berührt. Treibt man die Sache auf die Spitze und lässt das Licht rechtwinklig zur Achse kommen, zum Beispiel von unten in einen halben Parabolspiegel, so ergibt sich eine Kurve mit vielen Namen, denn verschiedene Leute haben sie in verschiedenen Kontexten immer wieder entdeckt. Sie heißt Kubik von l'Hôpital (nach Guillaume de l'Hôpital, 1661–1704, besser bekannt durch eine Berechnungsregel für Grenzwerte) und Trisektrix von Catalan (nach Eugène Catalan, 1814–1894, den die Nachwelt im Wesentlichen wegen seiner erst kürzlich bewiesenen Vermutung über Primzahlpotenzen kennt); im Jahr 1900 wurde sie nach Ehrenfried Walther von Tschirnhaus (1651–1708) benannt. Mit dem früher üblichen Genitiv heißt die Kurve »Tschirnhausens Kubik«. Viele Leute glaubten daraufhin, der Name sei »Tschirnhausen«; da diese Ungenauigkeit sich in zahlreichen Webseiten wiederfindet, empfiehlt es sich, eine Suchmaschine auch auf »Tschirnhausen« anzusetzen.

Tschirnhaus war hochgebildet und korrespondierte mit Gelehrten wie Spinoza, Huygens, Newton und besonders mit Leibniz. Er war als erster Deutscher ein auswärtiges Mitglied der französischen Académie des Sciences. Im Mathematisch-Physikalischen Salon im Zwinger in Dresden sowie in Museen in München und in Kassel kann man Brennspiegel und Linsen beachtlicher Größe bestaunen, die er gebaut hat, um mit Sonnenlicht hohe Temperaturen zu erreichen.

Sein Ruhm beruht heute vor allem darauf, dass er das Hartporzellan für Europa neu erfunden hat. Besser gesagt: Er sollte gerechterweise dafür berühmt sein. August der Starke hatte einen Menschen namens Johann Friedrich Böttger (1682–1719), der behauptet hatte, Gold machen zu können, und vor den Nachstellungen des Königs Friedrich I. aus Preußen geflohen war, einfangen lassen und Tschirnhaus unterstellt. Kurz vor seinem Tod stellte Tschirnhaus einen Becher aus Hartporzellan her, der aber bei einem Einbruch etwas später entwendet wurde. Böttger gab dies zu Protokoll und widmete sich dann selbst der Porzellanherstellung, die Tschirnhaus zu Lebzeiten allein betrieben hatte. Dabei wurde er so erfolgreich, dass er noch heute bei vielen zu Unrecht als der (europäische Nach-)Erfinder des Porzellans gilt.

PUBLIC DOMAIN (STICH VON MARTIN BERNIGEROTH)

Ehrenfried Walther von Tschirnhaus hat neben vielen anderen Dingen auch eine Kurve gefunden, die als Kaustik im parabelförmigen Spiegel auftritt.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: NORBERT TREITZ

Eine unerwartet bunte Mischung von Kurven, darunter prominente Kaustiken, lässt sich als MacLaurin-Spiralen interpretieren.

MacLaurins Sinusspiralen

Was ist eine Kaustik von einer Kaustik? Licht, das eine Kurve – von einem Punkt aus oder parallel aus weiter Ferne – beleuchtet, bringt eine Fülle von überraschenden Beziehungen im Wortsinn ans Licht (Bild S. 95 unten). Die Kaustik der Kaffeetassenkaustik für punktförmiges Licht ist die Kaffeetassenkaustik für paralleles Licht. Die Kurve der Exponentialfunktion erzeugt auf wundersame Weise eine Summe aus sich selbst und ihrem Spiegelbild: ein Cosinus hyperbolicus. Und die logarithmische Spirale reproduziert sich – mit einer Drehung – sogar selbst.

Schließlich lassen sich viele Kaustiken zusammen mit anderen Kurven unter einer einzigen Formel subsumieren:

$$r^m = r_0^m \cos(m\phi)$$

beschreibt, wie die Entfernung r vom Nullpunkt vom Winkel ϕ abhängt (Bild links). Colin MacLaurin (1698–1746) hat diese Kurvenklasse (die »Sinusspiralen«) untersucht. Ein Vorzeichenwechsel von m entspricht einer Inversion am Einheitskreis (Spektrum der Wissenschaft 5/2006, S. 106). ◁

Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

AUTOR

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/869381.

SCIENCE-FICTION

Von Fans für Fans

Seit 45 Jahren düsen Woche für Woche Perry Rhodan und seine Getreuen aus allen Winkeln des Universums durch den Weltraum – für eine Heftchenserie ein beispielloser Erfolg.

Mit Perry Rhodan ist es wie mit McDonalds: Keiner ist bereit zuzugeben, dass ihm das schmeckt, aber alle waren schon einmal da. Auch ich zähle zu den Perry-Rhodan-Fans der ersten Stunde. Die ersten Heftchen habe ich noch meinem Vater abgeluchst, später dann selbst gesammelt. Leider nehmen sie bei der Air Force keine Testpilotenanwärter mit Zahnplomben. Aus der Traum vom Raumschiffkapitän: Ich musste etwas Ordentliches studieren.

Das vorliegende Buch zeigt mir, dass ich mit meiner Begeisterung für die Helden der mittlerweile fast 2400 Folgen starken Groschenroman-Serie nicht allein war. Die Gründerväter, die 1961 in der damaligen Mondflugeuphorie die Figur des Perry Rhodan schufen, glaubten fünfzig Heftchen schaffen zu können und wurden von ihrem Verleger für größenwahnsinnig erklärt. Major Rhodan entdeckt 1971 – zur Zeit der Veröffentlichung noch in der Zukunft – bei der ersten Landung auf dem Mond ein gestrandetes Schiff einer außerirdischen Zivilisation und desertiert nach seiner Rückkehr, weil er statt Befolgung von Befehlen die Einigung der Menschheit im Sinn hat. Im Untergrund plant er das Solare Imperium – und hat nach fünfzig Folgen die ersten Schwierigkeiten überwunden, nicht zuletzt dank der überlegenen Technik der außerirdischen Zivilisationen.

Damit war die Technik der Raumfahrt zentrales Thema der frühen Geschichten – keine einfache Aufgabe, denn die Autoren wussten, dass Überlichtgeschwindigkeit ein Ding der Unmöglichkeit ist. Da musste man die Physik schon recht drastisch verbiegen.

Ähnlichkeiten zur – jüngeren – Fernsehserie »Star Trek« sind nicht zu übersehen. Aber deren Macher weisen den Verdacht, sie hätten bei »Perry Rhodan« abgekupfert, weit von sich: Welcher Amerikaner liest schon deutsche Groschenromane? Tatsächlich ist die Serie, manch amerikanischen Pseudonymen der Autoren zum Trotz, ein rein deutsches Gewächs; nur nach Japan und Brasilien ist sie erfolgreich exportiert worden.

Im Verlauf ihrer 45-jährigen Geschichte hat die Serie die jeweils aktuellen geistigen Strömungen aufgegriffen und in die Handlung eingebaut. Es begann mit dem Bedrohungsszenario des Kalten Krieges; dann kamen eine friedensbewegte Ära und eine esoterische, über die viele Altfans – darunter ich – nur die Nase rümpfen können. Spätere Heftchen kehrten zumindest teilweise zu den Wurzeln zurück. Auf der Leserkontaktseite machten sich die Fans ausführlich Gedanken darüber, wo in den Raumschiffen das Hypertakttriebwerk angebracht sein müsste, damit sein Energieausstoß nicht das ganze Ding zerreißt.

Günter Puschmann, Perry-Rhodan-Zeichner seit mehr als 25 Jahren, gestaltete diese Posterbeilage (»Waringer Akademie«) zu Heft 2250.

Die gelegentlich eingehefteten Risszeichnungen konnte man sich übers Bett hängen, um sich eine detaillierte Vorstellung vom Leben der Raumschiffbesatzungen zu machen. Inzwischen gibt es auch Bausätze zum Selberbasteln und – für die jüngere Generation – den Mausbiber Gucky als Plüschtier.

Der Erfolg sei das Werk aller Beteiligten, schrieb Walter Ernsting, einer der Initiatoren. Entsprechend viel Platz räumt das Buch der Vorstellung jedes einzelnen Autors ein: wann und wie er zur Mannschaft stieß und was er produziert hat. So ist das Buch mit etwas Mühe auch als Nachschlagewerk nutzbar. Alle – bedeutenden und weniger bedeutenden – Beteiligten an dem großen Gemeinschaftswerk werden gewürdigt, was die Sache etwas länglich macht.

Nicht selten war es der Tod, der die Beziehung zwischen Mitarbeiter und Team beendete. Herbert Johannes (»Johnny«) Bruck zeichnete die ersten 1799 Titelblätter und starb; auf dem 1800. Titelbild ist sein Konterfei zu sehen – in memoriam. Auch andere langjährige Mitstreiter wurden auf diese Weise gewürdigt.

Das aufwändig bebilderte Buch ist »von Fans für Fans«: Bei mir sind nostalgische Gefühle aufgekommen. Wer sich auch nur ein bisschen im Perryversum auskennt, entdeckt sehr schnell alte Bekannte und ist alsbald wieder mitten im Geschehen. Für alle anderen dürfte sich die Lektüre eher zäh gestalten.

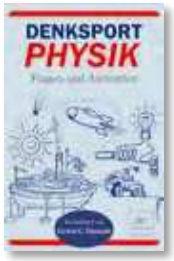
Alice Krüßmann

Die Rezensentin ist Bildredakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.

Eckhard Schwettmann
Allmächtiger!
Faszination Perry Rhodan
Hannibal, Höfen (Österreich) 2006.
352 Seiten, € 49,90

PHYSIK

Haltet Epstein-Stunden – und genießt sie!



Die Fragen sind nicht besonders originell; aber ihre Behandlung ist bei aller Leichtigkeit der Form voll tiefer Einsichten.

Für das keplersche Fernrohr gibt es eine gute Erklärung: Das Objektiv erzeugt ein Bild des fernen Objekts, und das Okular dient als Lupe, um dieses Zwischenbild vergrößert zu betrachten. Aber das holländische Fernrohr, bei dem das Okular eine Zerstreuungslinse ist? Lewis C. Epstein gibt eine wunderschöne Herleitung: Wären unsere Augen zum Beispiel dreimal so groß wie in der Realität, so wären die Netzhautbilder auch dreimal so breit und so hoch, denn die entscheidende Lichtbrechung geschieht an der gewölbten Frontfläche. Will man die großen Netzhautbilder haben, ohne sich neue Augen zuzulegen, so setze man exakt zwischen die Frontflächen des tatsächlich vorhandenen und des gewünschten größeren Auges ein geeignetes durchsichtiges Gefäß voll Wasser, das also hinten passend zum Auge hohl und vorne »erhaben« gewölbt ist. Ersatzweise kann man ein äquivalentes Gerät auch aus einer Konkavlinse, einem Luft-Zwischenraum und einer Konvexlinse zusammenbauen und dann als Fernrohr mit sich führen. Man muss es nicht einmal wie eine Kontaktlinse aufs Auge setzen, sondern kann es mit einigen Zentimetern Zwischenraum benutzen.

»Thinking physics« ist ein sehr treffender Titel für die Sammlung physikalischer Betrachtungen in Form klar formulierter Fragen und Antworten, die der kalifornische Physikprofessor Lewis Carroll Epstein erstmals 1979 mit dem Untertitel »Practical Lessons in Critical Thinking« veröffentlicht hat. Eine mir seit Längerem vertraute deutsche Übersetzung erschien 1988 bei Birkhäuser in Basel unter dem Titel »Epsteins Physikstunde«. Die vorliegende neue Übersetzung bezeichnet sich seltsamerweise als »deutsche Erstausgabe«, vielleicht weil Basel in der Schweiz liegt.

Der Titel »Denksport Physik« scheint auf den ersten Blick näher am Original zu liegen. Aber was ist die Rolle des Denkens in der Physik? In der neuen Ausgabe steht als Motto am Anfang der nicht besonders freundliche Spruch »Algebra ist eine wunderbare Erfindung. Mit ihr können selbst Idioten Physik betreiben, ohne sie zu verstehen«. Man kann einwenden, dass diese Idioten immerhin Algebra können müssen, aber das scheint viel einfacher zu sein als Physik – oder jedenfalls leichter abprüfbar. Ob einer richtig oder falsch rechnet, kann jeder andere herausfinden, dem die richtigen Ergebnisse mitgeteilt worden sind. Ob dagegen eine physikalische Argumentation sinnvoll ist, ob eine Erklärung tragfähig oder nur das Produkt einer Papageien-Dressur am Schüler ist? Man kann Schüler auch unbewusst dazu erziehen, mitgelieferte Zahlen auf Verdacht in einige vage aus dem Gedächtnis gekramte Formeln zu setzen, womit sie hinreichend viel Erfolg haben. Ist das am Ende das wahre Lernen für das Leben?

Welches ist der richtige Abwurfzeitpunkt für den Kot, um den Taubenjäger zu treffen?

Für Epstein ist Physik ganz entschieden nicht das Ausrechnen von Einsetz-Aufgaben, sondern das Denken über die Zusammenhänge. Das ist nicht ganz dasselbe wie Denksport. Naturwissenschaftliche Denkaufgaben funktionieren eigentlich nur, wenn die benötigten Gesetze hinreichend bekannt oder fast trivial sind. So kann man logisch austüfteln, wie man einen Wechselschalter bauen muss, aber schon das Verhalten verschiedener Stoffe bei unterschiedlichen Temperaturen erfordert das Wissen über spezielle Fakten, die man durch bloßes Denken nicht herausbekommen kann – anders als bei durchaus komplizierten Fragen aus Geometrie oder Kombinatorik.

Damit ist angedeutet, was Epstein nicht macht. Was er vermittelt, sind Kenntnisse über physikalische Größen, zum Beispiel die verschiedenen Rollen von Ladung und Energie beim elektrischen Strom oder von Impuls und Energie beim Schlag mit einem Hammer auf einen Amboss auf dem Bauch des Physikprofessors (was harmlos ist, solange der Mann mit dem Hammer nicht daneben haut).

Die Fragen des Buchs sind eher elementar als exotisch, aber auch für Physiker nicht durchweg trivial. Wird man auf falsche Fährten gelockt, so meistens nicht durch Hinterhältigkeit des Autors, sondern durch die Geheimniskrämerei der Natur selbst, die sich ihrem eigenen Produkt, dem menschlichen Gehirn, nur zögerlich zu erkennen gibt, teilweise aber auch durch ungeschickte Traditionen der Physik und ihrer Fachsprache.

In diesem Zusammenhang fällt auf, dass die neue Übersetzung an vielen Stellen besser ist als die alte. Wo »velocity« und »speed« in der alten ziemlich wörtlich mit »Geschwindigkeit« und »Schnelligkeit« übersetzt sind, nennt die neue den entscheidenden Unterschied beim Namen: Es geht um Vektor und Betrag der Geschwindigkeit.

Die Zeichnungen (allesamt vom Autor) sind inhaltlich klar und von heiterer Leichtigkeit. Pfiffig ist, dass Antworten, die auf der gleichen Buchseite wie die zugehörige Frage stehen, auf den Kopf gestellt sind, sodass das zu frühe Lesen erschwert wird.

Epsteins Werk belässt es nicht bei bloßen Antworten oder gar Schlagwörtern; es ist auch keine Sammlung exotischer Fragen mit Antworten, auf die nicht einmal Experten immer kommen. Die Probleme sind ganz überwiegend bedeutsam für physikalisches Verständnis; die Themen sind zwar nur selten originell, aber ihre Behandlung stets alles andere als abgedroschen, vielmehr auf leichte Weise tiefer und wesentlicher.

Wer sollte also Epstein lesen, durchdenken und weiterlesen? Jeder, dem Denken lieber als Rechnen oder Büffeln ist und der die Natur als Objekt zum Staunen und Denken ansieht. Ganz besonders aber auch jeder, der Physik vermittelt, indem er Lehrbücher schreibt oder Stunden gibt: Es sollten möglichst »Epstein-Stunden« sein!

Norbert Treitz

Der Rezensent ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

Lewis C. Epstein
Denksport Physik
Fragen und Antworten
Aus dem Englischen übersetzt und bearbeitet von Hans-Eberhard Lessing.
dtv, München 2006. 580 Seiten, € 19,50

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Der Superman der Mathematiker

Der unermüdlichste Rechner aller Zeiten hat eine farbenfrohe, populäre Darstellung seines Lebens wohl verdient.

Leonhard Euler (1707 – 1783) gilt als produktivster Mathematiker aller Zeiten und war gleichzeitig ein herausragender Physiker. Zahlreichen Forschungsfeldern von der Zahlentheorie bis zur Variationsrechnung hat er seinen bis heute prägenden Stempel aufgedrückt. Folgerichtig wird sein diesjähriger 300. Geburtstag mit allem Drum und Dran gefeiert, es gibt Symposien, Ausstellungen, Briefmarken – und eben auch einen Comic.

Ein schweizerisches Autorenteam zeichnet darin Eulers Lebensweg nach, beginnend mit Kindheit und Studium in Basel und der anschließenden Tätigkeit an den noch jungen Akademien in St. Petersburg und Berlin. Ein besonderer Reiz des Comics liegt darin, dass er diesen Lebensweg in die politische Geschichte Europas einbettet. Am originellsten und witzigsten sind die bissigen und treffenden Porträts der Herrschenden, allen voran ein reichlich unsympathischer Friedrich der Große, der vorwiegend mit den Schlesischen Kriegen beschäftigt ist. Stets befiehlt er seinem Untergebenen Euler in despotischem Tonfall, sich doch nun endlich einmal mit etwas für Flotte oder Heer Nützlichem zu beschäftigen oder wenigstens die Wasserspiele für seine nächste Party in Sanssouci herzurichten. Am russischen Zarenhof ist man meist freundlicher zu Euler, aber auch hier wird er bald für Schiffs- und Brückenbau herbeizitiert.

Daneben ist der Comic randvoll mit Anspielungen auf Eulers Werk und die zeitgenössischen wissenschaftlichen Debatten: Gleicht die Erdform eher einem Kürbis oder einer Zitrone? Hatte nun Newton oder Leibniz zuerst die Infinitesimalrechnung erfunden? Und hat Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698 – 1759) das Prinzip der kleinsten Wirkung, für das er berühmt wurde, nur von Leibniz geklaut? Das alles ist fast immer sorgfältig recherchiert, gut ausgewählt und erfreut die Insider, bleibt aber für weniger Eingeweihte vielleicht etwas unverständlich. Die Darstellung Eulers als neugierig, unermüdlich, genial und menschenfreundlich fällt im Geburtstagstaumel wohl etwas zu positiv aus; dezent verschwiegen werden sein religiöser Eifer und sein distanziertes Verhältnis zur französischen Aufklärung.

Insgesamt liegt ein durchaus gelungener und kurzweiliger Comic vor, der weniger wissenschaftliche Inhalte transportiert, dafür aber umso mehr über den Kontext verrät, in dem diese produziert werden. Man sollte ihn zugleich als Aufforderung verstehen, sich in der Wissenschaftsgeschichte öfter dieses unkonventionellen Mediums zu bedienen.

Oliver Walkenhorst

Der Rezensent hat Physik studiert und arbeitet am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

Andreas K. Heyne und Alice K. Heyne (Text), Elena S. Pini (Zeichnungen)
Leonhard Euler
Ein Mann, mit dem man rechen kann
Birkhäuser, Basel 2007. 52 Seiten, € 19,90

Das frühreife Genie (links) zeigt wenig Interesse für Militärisches (rechts).

MEDIZIN

Ein neues Standardnachschlagewerk

Das »Lexikon der Krankheiten und Untersuchungen« bietet Medizin kompakt für den Hausgebrauch.

Pseudo-Krupp ist eine äußerst dramatische Angelegenheit. Sowie es trocken und kalt wird, bekommt mein Kind einen heiser bellenden Husten, hohes Fieber und Atemnot, ich bringe es voll Panik zum ärztlichen Notdienst – und kann hinterher zu Hause in aller Ruhe gute Therapieratschläge nachlesen: feucht-kühle Luft zuführen (Fenster öffnen, Dusche im Bad anstellen), im akuten Fall Prednisonzäpfchen und einiges mehr. Damit gelingt es uns auch, die danach folgenden Anfälle zu meistern.

Auf der Suche nach Ursachen und Folgen einer Infektion auf der Haut finde ich im Sachverzeichnis unter »Hautentzündung« das Synonym »Dermatitis« und finde dann unter »Ekzem« das Wesentliche.

Ein wissenschaftlicher orientiertes Lexikon würde für jeden Fachausdruck einen eigenen Eintrag vorsehen – gut für den Fachmann, dem nur die eine Spezialinformation fehlt. Das vorliegende Werk geht einen laienfreundlicheren Weg: Es erklärt von »Abort« bis zu »Zyklusstörungen« kurz und schlüssig die wichtigsten medizinischen Begriffe, konzentriert auf die für ein Grundverständnis wesentlichen Aussagen. Fachbegriffe werden sofort erklärt und müssen nicht erst nachgeschlagen werden. Ursprünglich als Nachschlagewerk für Pflegekräfte und weitere Gesundheitsberufe konzipiert, eignet sich das Buch auch für den Laien. Zur Veranschaulichung gibt es viele praxisnahe, hilfreiche Abbildungen und Tabellen.

Eingeleitet wird jeder Beitrag mit echten Beispielen aus dem Alltag, was Interesse und Neugier weckt. Es folgt eine kurze, prägnante und verständliche Definition der Krankheit, gegebenenfalls Synonyme; dann Ursache, Symptome, Diagnose, Differenzialdiagnose, Therapie, Prognose und eventuelle Komplikationen. Jede Krankheit ist unter dem in der Praxis gebräuchlichsten Namen einsortiert. Wer sie auf diesem Weg nicht findet, kommt über verschiedene Übersichten und Stichwortverzeichnisse zum Ziel.

Die beiliegende DVD mit 72 kommentierten Videosequenzen macht Pflegetechniken wie die Stomapflege, den Verbandswechsel und die Wundbehandlung anschaulich und nachvollziehbar.

Insgesamt beschreibt das Lexikon 1000 Krankheiten – eine große Breite, die allerdings mit mangelnder Tiefe erkauft wird. Innerhalb der ein bis zwei Seiten pro Krankheit ist nur Platz für die häufigsten Verläufe und die wichtigsten Aspekte der Therapie. Seltenere Varianten wurden regelmäßig weggelassen. So sucht man unter »Thrombopenie« vergeblich nach dem Morbus Werlhof, einer Autoimmunkrankheit, deren Hauptsymptom eben die Thrombopenie (verminderte Anzahl von Thrombozyten) ist.

Einen Arztbesuch wird das Lexikon in der Regel nicht erübrigen, aber immerhin ergänzen. Es lädt zum Stöbern ein, liest sich trotz Fachlichkeit spannend und macht Lust auf genaueres Wissen.

Fazit: Dieses Buch ist jeden Cent wert und wird in so manchem Bücherregal den »Pschyrembel« um ein weiteres wichtiges Nachschlagewerk ergänzen.

Cécile Schütze-Gaukel

Die Rezensentin ist gelernte Buchhändlerin und arbeitet beim Springer-Verlag in Heidelberg.

Lexikon der Krankheiten und Untersuchungen
Thieme, Stuttgart 2006.
1463 Seiten, mit DVD, € 39,95

TECHNIKGESCHICHTE

Fünf Helden der Neuzeit

Den Filmemachern vom ZDF gelingt es, längst bekannte Geschichten von Erfindern, Konstrukteuren und Leitern spektakulärer Großprojekte neu und spannend zu erzählen.

Was haben Claude Dornier, Alfred Nobel, Thomas Alva Edison, Alvah Crocker und Ferdinand de Lesseps gemeinsam? Sie gehören zu den großen Visionären des 19. und 20. Jahrhunderts. Trotz heftiger Konkurrenz und Verwicklungen in zahlreiche Intrigen haben sie, getrieben von unermüdlichem Forscherdrang und der Faszination des Neuen, ihr Ziel nie aus den Augen verloren. Das vorliegende Buch, das als Begleitband zur dritten Staffel der ZDF-Serie »Mission X« erscheint, zeichnet die Geschichten der fünf Männer und ihrer Lebenswerke nach, einschließlich ihrer Nachwirkung für die Gegenwart.

So beispielsweise bei Claude Dornier (1884 – 1969), dem großen Konstrukteur der modernen Luftfahrt. Als Mitarbeiter von Ferdinand Graf von Zeppelin und später in seinen eigenen Flugzeugwerken hat er die Luftschifffahrt und die Flugzeugindustrie weltweit maßgeblich vorangetrieben. Dem fortwährenden Kampf mit seinem Konkurrenten Hugo Junkers und den Widrigkeiten des Zweiten Weltkriegs zum Trotz gelang es ihm, das Tor zur transkontinentalen Luftfahrt zu öffnen. Der Pionier im Metallflugzeugbau machte sich das 1906 erfundene Duraluminium zu Nutze, das stabil ist wie Stahl, aber viel leichter. Noch heute wird diese Legierung in fast unveränderter Form in der Luftfahrtindustrie eingesetzt.

Die Filmautoren Achim Scheunert und Christian Heynen haben – auch in der Buchform – aus den Geschichten ein stimmiges, informatives und optisch ansprechendes Gesamtwerk gemacht. Neben den Handlungen der Hauptfiguren fließen immer wieder biografische, zeitgeschichtliche und erklärende Elemente in den Text ein oder werden in farblich unterlegten Kästen präsentiert. Der Leser erhält damit ein umfassendes und sehr gut verständliches Bild der damaligen Situation.

Neben der Darstellung der Protagonisten als erfolgreiche Wissenschaftler und Geschäftsleute zeigen die Autoren auch deren verletzliche und emotionale Seiten. Alfred Nobel (1833 – 1896), heute vor allem bekannt als Stifter der Nobelpreise, galt zu seiner Zeit als »Symbol des Todes und des Schreckens«. Der ausgebildete Chemiker experimentierte mit Nitroglyzerin und entwickelte den Sprengstoff Dynamit – eine Forschungsarbeit mit

Eine der ersten Glühbirnen von Thomas Alva Edison (1847 – 1931)

vielen schweren Unfällen und Toten, darunter sein jüngster Bruder. Unter diesem negativen Image litt Nobel schon zu Lebzeiten. Die Stiftung der Nobelpreise ist auch als eine Art Wiedergutmachung zu verstehen.

Das Ende jeder Einzelgeschichte ist längst bekannt; gleichwohl sind die kurzweiligen, detailreichen Stücke richtig spannend. Wird Ferdinand de Lesseps das Geld für die Fertigstellung des Sueskanals erhalten? Wer macht am Ende das Rennen: Thomas Alva Edison mit seiner Idee vom Gleichstrom oder George Westinghouse mit seinem Wechselstromsystem? War es Mitte des 19. Jahrhunderts möglich, einen Eisenbahntunnel durch die Appalachen zu bauen, oder hat Alvah Crocker die technischen Möglichkeiten seiner Zeit überschätzt?

Insgesamt eine hervorragende Gelegenheit, auf unterhaltsame Weise mal eben so »im Vorbeilesen« die großen Visionäre kennen zu lernen und dabei das eigene Allgemeinwissen aufzufrischen.

Susanne Gellweiler

Die Rezensentin ist Diplombiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Mainz.

Günter Myrell und Daniel Manthey (Hg.)
Mission X
Genialen Entdeckern
und Erfindern auf der Spur
dtv, München 2006. 224 Seiten, € 15,–

PREISRÄTSEL

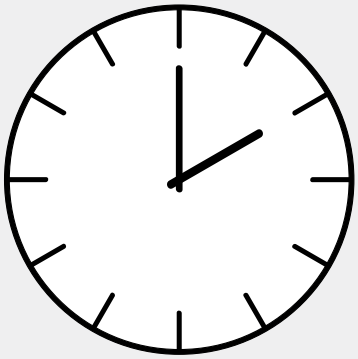
Uhrenvergleich

Von Pierre Tougne

Wie wichtig ist es eigentlich, dass Stunden- und Minutenzeiger einer Uhr unterschiedlich lang sind oder überhaupt unterschiedlich aussehen? Meistens kann man ja bereits anhand der Zeigerstellung eindeutig entscheiden, wie spät es ist. Dass die abgebildete Uhr gerade 2 Uhr anzeigt, könnte man auch dann noch mit Sicherheit ablesen, wenn Minuten- und Stundenzeiger exakt das gleiche Aussehen hätten, denn um 12.10 Uhr würde der Stundenzeiger nicht genau auf die Zwölf zeigen.

Zu gewissen Zeiten kann man aber den Stundenzeiger mit dem Minutenzeiger verwechseln.

Wie viele zweideutige Zeigerstellungen gibt es zwischen Mitternacht und 12 Uhr mittags? Wie groß sind dabei der größte und der kleinste Fehler, den man macht, wenn man die beiden Möglichkeiten verwechselt?

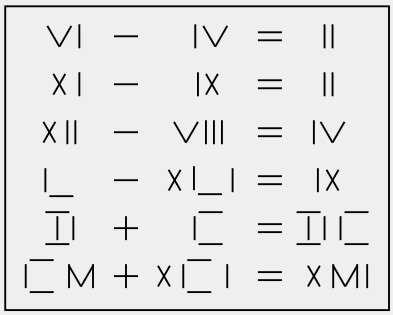


Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg oder per E-Mail an preisraetsel@spektrum.com. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Rucksäcke »Elefant« mit Fraktalmotiv. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, den 15. 05. 2007, eingehen. Unsere Preisrätsel finden Sie auch im Internet unter www.spektrum.de/preisraetsel.

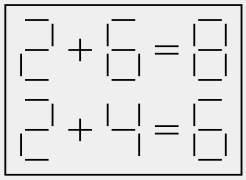
Lösung zu »Hölzchen-Arithmetik« (März 2007)

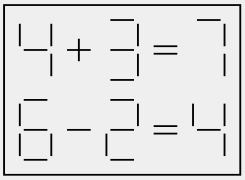
Durch Umlegen eines Streichholzes in jeder Gleichung erhält man die rechts und unten abgebildeten korrekten Gleichungen – zum Beispiel. Für vier der Gleichungen haben einige Leser weitere Lösungen gefunden.

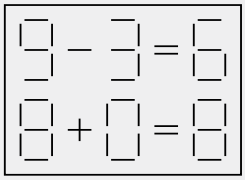
Viele Leser haben auch bemerkt, dass die Darstellung IC in römischen Ziffern für 99 zwar der Regel entspricht, nach der eine kleinere Ziffer vor einer größeren abzuziehen ist, aber nicht der üblichen Konvention folgt. Die korrekte Darstellung ist XCIX; entsprechend muss man CMXC statt XM für 990 schreiben.



Die Gewinner der drei T-Shirts sind Maria Schupp, Diepholz; Anna-Karina Ebert, Bad Camberg; und Niklaus Köchli, Sarmenstorf (Schweiz).







Lust auf noch mehr Rätsel? Unsere Online-Wissenschaftszeitung spektrumdirekt (www.spektrumdirekt.de) bietet Ihnen unter dem Stichwort »Knobelei« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Wie kann man Medikamente am Menschen erproben?

Vor über einem Jahr sind in London bei einem Medikamentenversuch Menschen lebensgefährlich erkrankt. Welche Konsequenzen ergeben sich daraus für die medizinische Forschung?

Von Urban Wiesing

Ärzte sollen nur geprüfte Therapien anwenden, die sie aber streng genommen vorher gar nicht prüfen dürfen

Es mag befremdlich klingen, aber in gewisser Hinsicht waren die Londoner Versuche heilsam. Denn sie haben aufgerüttelt und den öffentlichen Blick für ein Problem geschärft, das schon seit geraumer Zeit vorhanden ist. Dieses Problem wird in Zukunft wohl noch wachsen, obwohl seine Existenz gerne verdrängt wird: die klinische Forschung am Menschen.

Was war geschehen? Im pharmakologischen Testinstitut der Firma Parexel am Northwick Park Hospital in London wurde am 13. März 2006 erstmals der monoklonale Antikörper TGN1412 am Menschen erprobt. Er war gegen den Oberflächenrezeptor CD 28 an T-Zellen gerichtet, einer Gruppe der weißen Blutkörperchen. Langfristig erhoffte man sich therapeutische Wirkungen bei chronisch-lymphatischer Leukämie sowie bei Autoimmunerkrankungen. Der Wirkstoff wurde im Auftrag des Start-up-Unternehmens TeGenero von der Firma Böhringer Ingelheim hergestellt, Parexel arbeitete ebenfalls im Auftrag von TeGenero. Vorherige Tierversuche hatten keine Hinweise auf unerwünschte Wirkungen ergeben.

Von den acht gesunden Probanden erhielten sechs das *Verum* (lateinisch: das Wahre, das wirkstoffhaltige Medikament), zwei ein Placebo, also ein Scheinmittel. Alle sechs Probanden mit dem *Verum* zeigten wenige Stunden nach der Injektion eine schwere immunologische Reaktion, ein so genanntes Zytokin-Release-Syndrom. Diese führte zu erheblichen, lebensgefährlichen Gesundheitsstörungen mit multiplem Organversagen. Zum Teil mussten die Betroffenen über Wochen intensivmedizinisch behandelt werden. Alle Versuchspersonen überlebten.

Die Substanzklasse der monoklonalen Antikörper ist nicht neu. Vielmehr sind in Europa 17 Substanzen dieser Art bereits zugelassen. Zahlreiche weitere werden derzeit erprobt. Mit dieser Substanzklasse sind berechtigte Hoffnungen auf therapeutische Fortschritte verbunden. Die Firma TeGenero musste mittlerweile Konkurs anmelden.

Soweit die Fakten. Doch wie sind die Vorkommnisse zu bewerten? Die Londoner Versuche verweisen zunächst einmal auf das längst bekannte Grundproblem der Forschung am Menschen, auf ein Dilemma, mit dem sich die moderne Medizin strukturbedingt seit ihrer Orientierung an den Naturwissenschaften konfrontiert sieht. Auf der einen Seite weiß man, dass sich die wichtigsten Erkenntnisse über Wirksamkeit und Unbedenklichkeit von Therapien nur durch Forschung am Menschen gewinnen lassen. Tier- und Laborversuche müssen klinische Forschung ergänzen, können sie aber nicht ersetzen.

Auf der anderen Seite sind Versuche am Menschen unweigerlich mit einem Schadensrisiko für die Patienten verbunden. Dies widerspricht der ärztlichen Verpflichtung, vor allem nicht zu schaden, *primum nil nocere*. Ein Schadensrisiko ist in der Forschung jedoch unvermeidlich. Wer ernsthaft forscht, muss den Schritt ins Ungewisse wagen und Risiken eingehen. Denn wenn man vorab weiß, dass für den Patienten kein Risiko besteht, weil ein bestimmtes Medikament nutzt und nicht schadet, dann bedarf es der klinischen Forschung zu diesem Medikament nicht mehr. Würden Mediziner aber auf klinische Versuche am

Menschen verzichten, nur um Konflikte mit dem ärztlichen Ethos zu vermeiden, dann müssten zukünftige Patienten mit unerforschten Mitteln behandelt werden. Das würde jedoch die Qualität ärztlicher Handlungen empfindlich mindern. Das Dilemma, mit dem sich jede moderne Medizin konfrontiert sieht, besteht nun darin, dass Ärzte ausschließlich wissenschaftlich geprüfte Therapien anwenden sollen, diese aber streng genommen vorher gar nicht wissenschaftlich prüfen dürfen.

Vorbild Nürnberger Ärzteprozess

Als Antwort auf diese Zwickmühle hat sich in den westlichen Gesellschaften ein breiter Konsens herausgebildet, dem zufolge die Forschung am Menschen grundsätzlich legitim ist, allerdings unter strengen Bedingungen: Dazu zählt neben hohen Anforderungen an die Forscher und an das Forschungsprojekt die Wahrung der Rechte der Patienten und Probanden, zu denen insbesondere das freie und informierte Einverständnis zur Teilnahme an Versuchen gehört. Außerdem gilt es, Maßnahmen zur Minimierung von Risiken zu treffen. Historisch bedeutsam waren in diesem Zusammenhang der Nürnberger Codex von 1947, ein Bestandteil der Urteilsbegründung im Nürnberger Ärzteprozess, sowie die mehrfach revidierte Deklaration von Helsinki des Weltärztebundes. Mittlerweile sind die Bedingungen für klinische Forschung am Menschen auch in Gesetzen und Verordnungen verankert.

Doch die Londoner Versuche verweisen darüber hinaus auf eine neue Schwierigkeit. Hier wurde eine Therapie erprobt, die ausschließlich auf die Behandlung von Menschen ausgelegt war. Der monoklonale Antikörper war gezielt gegen eine Struktur im menschlichen Immunsystem entwickelt worden. Damit verlieren Erkenntnisse aus vorherigen Tierversuchen, die sich allemal nicht eins zu eins auf den Menschen übertragen lassen, zusätzlich an Aussagekraft. Neben den bekannten Problemen stellte sich hier die Frage, wie eine speziesspezifische Therapie erstmals am Menschen erprobt werden sollte.

Zunächst liegt der Verdacht nahe, die deutsche Firma habe die Versuche in London durchführen lassen, weil ethische und rechtliche Standards dort niedriger seien. Dies trifft jedoch nicht zu. Es ist der Europäischen Union zu verdanken, dass in ihrem Raum weit gehend einheitliche Richtlinien in der klinischen Forschung gelten. TeGenero entschied sich für London, weil die britische Behörde schneller reagierte als das deutsche Paul-Ehrlich-Institut (das drei Wochen später auch seine Zustimmung zu dem Vorhaben gab).

VARIO IMAGES / PROFIMEDIA

Der Blick des Probanden auf die Infusionsflasche: Wer sich freiwillig Tests mit neuen Medikamenten unterzieht, setzt sich immer einem bestimmten Risiko aus.

Nach dem bestürzenden Vorfall wurde eine Untersuchungskommission eingesetzt. Ihr Bericht bemängelt zwar einige Kleinigkeiten, aber eben keinen groben Verstoß gegen die Richtlinien der Arzneimittelerprobung. Der Wirkstoff wurde korrekt hergestellt, er war nicht verunreinigt und die Anwendung geschah wie im Prüfplan vorgesehen, den immerhin zwei Behörden genehmigt hatten. Kritisiert wurden die mangelnde Erfahrung eines Prüfarztes sowie eine ungenügende Aufklärung der Probanden über die ▷

▷ Versicherung. Zudem existierten keine Pläne für ein Vorgehen bei Notfällen und zwei Wissenschaftler wiesen darauf hin, dass es ganz vereinzelte Hinweise auf die Toxizität ähnlicher Substanzen gegeben hätte. Für alle Kritikpunkte, bis auf den letzten, gilt: Sie hätten das Ereignis nicht verhindern können.

Was also soll künftig geschehen? Die Erprobung speziesspezifischer Therapien ist vor allem deshalb problematisch, weil sie schwer kalkulierbare Risiken birgt, insbesondere bei der ersten Anwendung am Menschen, bei so genannten *first-in-man-studies*. Die Antwort darauf kann nur lauten: Das Risiko ist zu minimieren. Wie wäre dies bei den Londoner Versuchen möglich gewesen? Man hätte zunächst nur einen Probanden mit der Substanz behandeln sollen, nicht gleich alle sechs Probanden auf einmal. Diese Erkenntnis ist nahe liegend und unbestritten. Doch mit diesem Vorgehen hätte man zwar das Risiko begrenzt, aber eben nicht völlig aus der Welt geschafft. Man hätte zwar nicht sechs, aber immer noch einen Probanden erheblich geschädigt, also den Schaden nur quantitativ verringert. Aber genau das ist der Konflikt. Das Risiko lässt sich nicht vollends aus der Welt schaffen. Wie gesagt: Wer wirklich forscht, muss den Schritt ins Ungewisse wagen und Risiken eingehen.

Zudem sind Anstrengungen notwendig, wenn speziesspezifische Therapien erprobt werden sollen. Präklinisches Wissen sollte besser verbreitet werden, sodass alle Kenntnisse zur Toxizität Forschern und klinischen Medizinern direkt zugänglich werden. Darauf zielt die erwähnte Kritik an den Londoner Versuchen, dass es durchaus vereinzelte Hinweise auf die Toxizität gegeben hätte. Eine internationale Datenbank könnte hier Abhilfe schaffen; sie scheitert – bis heute noch – vor allem an Bedenken wegen Firmengeheimnissen und Patentschutzfragen. Doch bei gegenläufigen Interessen müsste sich ein Kompromiss finden lassen. Pharmazeutische Firmen wären in der Tat in ihrer wirtschaftlichen Existenz gefährdet, wenn alle ihre Erkenntnisse zur Entwicklung neuer Medikamente sofort im Internet zu erfahren wären. Doch schließt dies einen besseren Zugang zu den toxikologischen Daten nicht unbedingt aus. Hier ist eine geschickte Regulierung gefordert, um weitere Risiken für Versuchspersonen zu vermeiden.

Es ist überdies geboten, bei solchen Tests die Einstiegsdosis vorsichtiger zu wählen. Weiterhin sollten die Forscher neue Tiermodelle entwickeln, die aussagekräftiger sind als die jetzigen, oder Simulationen im Labor, die bessere Erkenntnisse über die Toxizität liefern. Und man könnte versuchen, analoge Substanzen für die Tiere zu produzieren, an denen sie vorher getestet werden sollen. Doch auch hier gilt: Alles das wird das Risiko für die Probanden bei der ersten Erprobung am Menschen nur verringern. Und es besteht kein Zweifel: Man sollte diese Anstrengungen unternehmen. Doch eine gewisse Gefährdung wird niemals völlig verschwinden.

Auch gute Forschung ist riskant

Was bleibt zu tun? Man wird die Testpersonen informieren müssen. Es muss ihnen explizit gesagt werden, dass es sich um die erste Erforschung eines Medikaments handelt, das für Menschen entwickelt wurde, und dass vorhergehende Tierversuche nur bedingte Aussagekraft besitzen.

Es stellt sich überdies die Frage, ob man neue Wirkstoffe für den Menschen nicht zuerst an Kranken erprobt. Man verfährt bereits in dieser Weise bei Zytostatika, also Mitteln zur Krebstherapie, die so giftig sind, dass man sie anfangs nicht an Gesunden, sondern direkt an Krebskranken testet. Für eine solche Vorgehensweise spricht, dass Krebskranke bereits davon profitieren könnten, sofern der Wirkstoff sich als hilfreich erweisen sollte, und deswegen das Risiko eher gerechtfertigt ist. Doch dabei handelt es sich um eine heikle Argumentation, denn im konkreten Fall in London hätten Kranke nicht profitiert. Im Gegenteil: Schwerkranke Patienten hätten diese Versuche vermutlich gar nicht überlebt. Zudem muss man in Rechnung stellen, dass sich Todkranke in aussichtslosen Situationen häufig an jede Hoffnung klammern. Damit stellt sich die Frage nach der Qualität ihrer Zustimmung. Kommt ihr Einverständnis in verzweifelter Situation wirklich freiwillig zu Stande? Der Ausweg, neue speziesspezifische Therapien zuerst an Kranken zu erproben, lässt sich allenfalls als Entscheidung in Einzelfällen rechtfertigen, wenn begründete Hoffnung auf ein günstiges Verhältnis von Nutzen und Risiko besteht.

Insofern bleibt von den Londoner Versuchen vor allem die Einsicht, dass gute Wissenschaft immer Risiken birgt – selbst bei sorgfältigsten Vorsichtsmaßnahmen. Und weiter gilt: Nicht nur schlechte klinische Forschung ist riskant, sondern auch gute. Nicht nur ist jede Abweichung vom Prüfplan riskant, sondern auch seine strikte Befolgung. Nicht nur der Missbrauch, sondern auch die korrekte Anwendung aller Vorschriften und Regeln kann problematisch sein. Wenn diese Einsicht sich als Resultat der Londoner Versuche in der Öffentlichkeit verbreiten würde, dann wären sie immerhin heilsam für das Verständnis von klinischer Forschung und ihren unvermeidlichen Risiken gewesen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Urban Wiesing, Jahrgang 1958, studierte Medizin, Philosophie, Soziologie und Geschichte der Medizin in Münster und Berlin, promovierte 1987 in Medizin, habilitierte 1993 und promovierte 1995 zum Dr. phil. Seit 1998 hält er an der Universität Tübingen den Lehrstuhl für Ethik in der Medizin. Wiesing ist Direktor des dortigen Instituts für Ethik und Geschichte der Medizin und außerdem seit 2004 Vorsitzender der Zentralen Ethikkommission bei der Bundesärztekammer.

Ethik in der Medizin. Ein Studienbuch. Von U. Wiesing (Hg.). Reclam-Verlag, Stuttgart 2004

Ethical issues in medical research. Von J. Boomgaarden, P. Louhiala, U. Wiesing (Hg.). Berghahn Books, New York, Oxford 2003

Ethik in der medizinischen Forschung. Von U. Wiesing, A. Simon, D. v. Engelhardt (Hg.). Schattauer Verlag, Stuttgart 2000

Abschlussbericht zu den Londoner Versuchen: http://www.dh.gov.uk/en/Publicationsandstatistics/Publications/PublicationsPolicyAndGuidance/DH_063117

Rechnen mit Plasmonen

Von Lichtsignalen erzeugte Elektronendichtewellen können auf engstem Raum enorme Datenmengen speichern und ermöglichen ultraschnelle Computerchips

PHIL SAUNDERS, SPACE CHANNEL LTD.

WEITERE THEMEN IM JUNI

Lauschangriff aufs Gehirn

Experimente mit Ratten, die durch enge Löcher schlüpfen, liefern Aufschlüsse darüber, wie das Gehirn Informationen in räumlich-zeitlichen Erregungsmustern verschlüsselt

ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA, TURIN

Urkilogramm mit Verfallsdatum

Der 117 Jahre alte Gewichtsstandard wird der modernen Technik nicht mehr gerecht. Doch Ersatz ist schwer zu finden

Hatte das Universum einen Anfang?

Mit neuen Modellen wagen Theoretiker Aussagen über die Zeit vor dem Urknall. Der Ursprung des Universums wird zum Prüfstein der Quantengravitation

MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK / MILDE SCIENCE COMMUNICATION

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter

Dieser Artikel ist als 'Plus'-Artikel zur Ausgabe
» Spektrum der Wissenschaft, Mai 2007
nur Abonnenten der Zeitschrift zugänglich

präsentiert von www.mag-heaven.dl.am

NUBIEN I

Strom gewinnen, Geschichte verlieren

Von Klaus-Dieter Linsmeier

Ein gigantischer Damm soll den Nil im Sudan aufstauen. Er wird eine Region versinken lassen, die zu Unrecht wie ein Hinterhof der Geschichte wirkt. Und er dürfte dem Volk der Manasir die Kultur rauben.

ALLE FOTOS DIESES ARTIKELS: H.U.N.E.

Man kann es der Regierung des Sudan kaum verübeln, dass sie den wenigen Ballungszentren mehr Elektrizität zukommen lassen will. Strom bedeutet nicht nur Komfort, sondern auch industrielle Entwicklung. Um die Stromerzeugung aber ist es im Land schlecht bestellt, wie Vergleichszahlen aus dem Jahr 2002 verdeutlichen: Der mittlere Pro-Kopf-Verbrauch im Sudan betrug gerade einmal 58 Kilowattstunden, während dem Nachbarn Ägypten immerhin 15-mal so viel zur Verfügung stand; Einwohner der Europäischen Union verbrauchten sogar durchschnittlich 6730 Kilowattstunden.

Das Vorhaben ist gewaltig: Ein mehr als neun Kilometer langer Damm soll den Nil auf einer Länge von 174 Kilometern aufstauen, zehn riesige Turbinen jährlich 5,5 Terawattstunden (Milliarden Kilowattstunden) liefern – eine Verdopplung der gesamten heutigen Stromerzeugung des Sudan. Hinzu käme die Möglichkeit, durch Kanäle fruchtbares Land gezielt zu bewässern. Auch wenn der Nassersee in Ägypten mehr als zehnmal so viel Wasser fasst – ein solches Mammutprojekt wurde in Afrika schon lange nicht mehr in Angriff genommen.

Die Nachteile schienen leicht verschmerzbar. Der Damm sollte am 4. Katarakt entstehen, also an einem der sechs durch Felsen und Stromschnellen nur schwer schiffbaren Bereiche im Mittellauf des Nils. Eine öde Gegend. Der etwa 800 Quadratkilometer große Stausee würde vor allem Wüste und Felsen überfluten. Den schmalen, fruchtbaren Uferstreifen und die größeren Inseln bewohnen etwa 50 000 Menschen, meist vom Stamm der Manasir. Sie züchten dort Ziegen und Schafe, bauen auf kleinen Parzellen Feldfrüchte an und pflegen ihre Dattelpalmenhaine.

Für die Umsiedler werde aufs Beste gesorgt: Entschädigungen, neue Dörfer am Nil, fließend Wasser, Strom, Schulen und ▶

NUR EIN SCHMALER STREIFEN
fruchtbares Land (links) ernährt die Bauern am 4. Katarakt. Sand und Felsen bergen Überraschungen. Was in diesem weiten Tal auf der Insel Us nur wie ein dunkler Fleck im Sand wirkt (rechts, gelber Rahmen), entpuppte sich bei einer Begehung durch deutsche Forscher als archäologische Stätte der Jungsteinzeit.

UM SEINE ENERGIEPROBLEME zu lösen, will der Sudan den Nil im Bereich des 4. Katarakts aufstauen. Archäologische Fundplätze werden zerstört und ein ganzes Volk verliert seine Wurzeln.

FELSBILDER FINDET MAN OFT in der Region. Diese 2000 Jahre alte Darstellung auf der Insel Us zeigt eine Kamelkarawane. Im Hintergrund der alles beherrschende Berg Gebel Us

► medizinische Einrichtungen – ein Komfort, den die Manasir derzeit nicht kennen. Wer heute ihre Dörfer aufsuchen will, benötigt ein Fahrzeug, das im tiefem Sand ebenso gut zurechtkommt wie auf den felsigen Hügeln der Kataraktlandschaft.

Doch wer sollte schon in diese trostlose Gegend reisen? Auch Archäologen zog es nur selten an die Ufer des 4. Katarakts. Was konnte diese Region jemals anderes gewesen sein als ein Hinterhof der Geschichte?

Vision und Wirklichkeit

Jahrzehntelang harrte der Traum vom großen Damm der Realisierung. Während Ägypten den Assuanstaudamm baute, fand der Sudan keine Finanziers. Hinzu kam Ende der 1980er Jahre ein verheerender Bürgerkrieg zwischen dem islamischen Norden und dem christlichen Süden. Doch das Blatt wendete sich, als in den 1990er Jahren große Erdölvorkommen entdeckt wurden. Vor allem das aufstrebende China war interessiert. Die Einführung des Mehrparteiensystems 1999 und direkte Gespräche mit den südsudanesischen Rebellen ermöglichten internationale Investitionen; 2005 unterzeichneten die verfeindeten Parteien ein Friedensabkommen.

Dass etwa zur gleichen Zeit ein Kampf um Ressourcen in der von Dürren heimgesuchten westsudanesischen Provinz Darfur in Massenmord mündete, tat dem Dammprojekt keinen Abbruch. Im Jahr 2003 beauftragte der Sudan das Pekinger Unternehmen International Water and Electric mit der Umsetzung der Pläne, ein 1,5-Milliarden-Dollar-Projekt, an dem unter anderem auch das deutsche Unternehmen Lahmeyer International als Subunternehmer teilhat. Der Sudan lud außerdem Archäologen ein, das Überflutungsgebiet zu untersuchen, ein halbes Dutzend Teams aus Amerika, Deutschland, England, Polen und Ungarn folgten dem Aufruf. Weil diese ihre Expeditionen selbst finanzieren, wurden ihnen die Hälfte der für Museen geeigneten Funde versprochen.

Die Arbeiten am Damm begannen vor drei Jahren und bald zeigte sich, dass Vision und Wirklichkeit oft nicht im Einklang stehen. Denkmalschützer warnen inzwischen davor, dass steigende Grundwasserspiegel die Ruinen von Napata und

Verärgerte Nachbarn, besorgte Umweltschützer

Die stromaufwärts gelegenen Staaten Äthiopien, Uganda, Ruanda, Burundi, Kenia und Tansania protestieren gegen den Merowe-Damm, denn sie sehen ihre eigene Wasser- und Stromwirtschaft gefährdet. Allerdings haben diese Nilanrainer mit Ausnahme von Äthiopien 1959 ein Abkommen unterzeichnet, in dem sie auf alle Rechte am Nilwasser verzichten – Ägypten werden darin 82 Prozent des Wasservolumens zugesichert, dem Sudan der Rest. Doch dieser Vertrag, so halten die Anrainerstaaten entgegen, sei noch unter kolonialen Bedingungen diktiert worden – England hatte den Sudan erst drei Jahre zuvor in die Unabhängigkeit entlassen.

Doch auch dem Land selbst könnte der Damm Probleme bereiten, warnte die Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) im März vergangenen Jahres. Denn die Umweltgutachten seien absolut unzureichend. So sei damit zu rechnen, dass sich die Wasserqualität drastisch verschlechtern werde, auch dürften sich Krankheitsüberträger wie Moskitos und Wasserflöhe stärker vermehren als bislang.

Besonders gravierend aber: Das Reservoir könne alljährlich bis zu 130 Millionen Tonnen Sediment zurückhalten und schon nach fünfzig Jahren etwa 34 Prozent weniger Wasser speichern. Hinzu käme, dass die hohe Sedimentfracht die Erosion der Uferzonen fördert.

Ein weiteres Problem: Der Wasserspiegel werde tagtäglich um bis zu vier Meter schwanken, was die Ökosysteme der Uferzonen belaste. Überdies ist geplant, den See im Lauf des Sommers zu füllen und dann allmählich weit gehend zu entleeren, seine Fläche schrumpft infolgedessen von 800 auf 350 Quadratkilometer. Trockenfallende Ufer seien aber der Erosion ausgesetzt.

Selbst den ökologischen Nutzen der Wasserkraftanlage in Bezug auf den Treibhauseffekt stellte die EAWAG in Frage. Auf Grund des hohen Sedimentgehalts können sich im Sommer anaerobe Wasserschichten bilden, in denen Methan produzierende Algen gedeihen. Das International Rivers Network hat errechnet, dass die Treibhausgasemissionen des Wasserkraftwerks unter diesen Umständen denen einer Erdgasanlage gleicher Leistung entsprächen.

die Königsfriedhöfe von Kurru und Nuri gefährden könnten. Die Anrainerstaaten nilaufwärts beschwerten sich und ein Schweizer Wasserforschungsinstitut hält bisherige Umweltgutachten für eklatant falsch (siehe Kasten oben).

Ärger drohte auch von anderer Seite: Die Manasir protestierten. Das mochte daran liegen, dass die Regierung sie im wahrsten Sinn des Wortes in die Wüste schickte. Zwar versprach man ihnen Dörfer in Nilnähe. Tatsächlich aber befindet sich der Fluss nicht einmal in Sichtweite der bereits erstellten Siedlungen. Wohl wegen des künftig stark schwankenden Wasserspiegels sollen die Ufer unbewohnt bleiben. Deshalb werden Kanäle und Pumpwerke über mehrere Kilometer Wasser in die Umsiedlungsdörfer liefern – kostenpflichtig.

Wasser als Waffe

Die versprochenen Ausgleichszahlungen stellten auch nicht jeden zufrieden, da sie beispielsweise nur den Ausfall von vier Dattelernten berücksichtigen, die neu zu pflanzenden Bäume aber erst nach vielen Jahren Früchte tragen. Nomadisch im Hinterland des Niltals lebende Manasir fielen ganz durch das Raster, denn die Kompensationszahlungen basierten auf Haus- und Grundbesitz (siehe Interview nächste Seite). Und manche Manasir wollten ihre Heimat schlicht nicht verlassen.

Als chinesische Ingenieure im November 2005 den Bewohnern eines Dorfes den Zugang zu Brunnen verwehrten, kam es zu Ausschreitungen. Der Konflikt eskalierte im April 2006: Drei Bauern starben bei einem Feuergefecht, zahlreiche Personen wurden verletzt. Und plötzlich steckten die an der Vergangenheit des 4. Katarakts interessierten Archäologen in einem Krisengebiet. Man könne für die Sicherheit der Fremden nicht mehr garantieren, erklärten die Stammesführer nun und verlangten deren Abreise. Die Leiterin des deutschen Projekts, Claudia Näser von der Berliner Humboldt-Universität, erfuhr von den Manasir, dass diese auf einen Stopp des Dammbaus hofften, wenn die archäologischen Arbeiten nicht vorankämen. Sie irrten – Anfang August 2006 mussten mehr als hundert Familien aus ihren Häusern fliehen, nachdem die Regierung ohne vorherige Warnung die Schleusen des Damms schließen ließ. Seither füllt sich der See, im nächsten Jahr soll er seine volle Ausdehnung erreicht haben.

Damit bleibt freilich auch den Archäologen nicht mehr viel Zeit, ohnehin läuft ihre Grabungskonzession in wenigen Monaten aus. Bis dahin haben sie alle Hände voll zu tun. Denn die Ufer des 4. Katarakts waren in der Vergangenheit keineswegs menschenleeres Nirgendwo. Vielmehr wird der Stausee zehntausende Fundstätten verschlingen.

DIE UNWIRTLICHE GEGEND des 4. Katarakts bot, wie diese Mauerreste einer Kirche zeigen, Christen Rückzugsmöglichkeiten bis ins Mittelalter.

Was die Wissenschaftler inzwischen entdeckt haben, beweist: Bereits in der Steinzeit wurde der 4. Katarakt häufig von Jägern aufgesucht. Davon zeugen beispielsweise Tausende von Steinabschlägen an zwei Quarzitadern, die britische Forscher 2005 entdeckten. Insbesondere ge- ▶

»Archäologie am 4. Katarakt ist Knochenarbeit«

Claudia Näser, Sudanexpertin, Juniorprofessorin am Seminar für Archäologie und Kulturgeschichte Nordostafrikas der Humboldt-Universität zu Berlin ist im Rahmen der Nubien-Expedition der Hochschule (H.U.N.E) für die Arbeit auf drei Nilinseln verantwortlich.

Frau Professor Näser, jahrelang fand der 4. Katarakt kaum Beachtung bei Archäologen, nun heißt es plötzlich, Zehntausende von Fundstätten werden demnächst in den Fluten verschwinden. Was ist da schiefgegangen?

Auch wenn die Archäologie in den Medien boomt, leidet unser Fach – von wenigen Prestigeprojekten abgesehen – unter notorischem Geld- und Personalmangel. Wir wussten, dass der 4. Katarakt Zeugnisse der Vergangenheit zu bieten hat, denn seit den 1940er Jahren wurde die Region gelegentlich auch von Forschern besucht. Doch der Aufwand, dort zu arbeiten, ist so immens, dass andere Gebiete den Vorzug erhielten. Allerdings waren wir dann tatsächlich überrascht, dass sich diese Gegend als eine solch bedeutsame Fundgrube entpuppte.

Mit welchen Fragestellungen sind Sie 2004 erstmals dorthingefahren?

Die mussten wir vor Ort gemeinsam mit den anderen Teams entwickeln, denn niemand wusste genau, was ihn erwartet. Unser Konzessionsgebiet umfasst im Wesentlichen einen Streifen Nilufer von etwa vierzig Kilometer Länge sowie drei mehrere Quadratkilometer große Inseln. Auf einer von ihnen, der Insel Us, entdeckten wir bei den Surveys einen Siedlungsplatz aus der Jungsteinzeit mit Hunderten von Tierknochen. Viele stammten von domestizierten Rindern, andere von Flusspferden und Gazellen, also Beutetieren. Dann gibt es dort Schutthügel, das sind Überreste von Kirchen. Christen schätzten im Mittelalter offenbar die Abgeschiedenheit solcher Inseln. Das Neolithikum und das Mittelalter bilden deshalb unsere Forschungsschwerpunkte, während andere Teams sich entsprechend der Fundlage ihrer Konzessionsgebiete beispielsweise auf die Kerma-Zeit konzentrieren.

Wie muss man sich die Gegend vorstellen?

Endlose Wüste, durchbrochen von bizarren Felsformationen, die Plateaus, Hügel, aber auch berghohe Massive bilden. Eines dieser Bergmassive, Gebel Us, beherrscht weithin sichtbar unser Konzessionsgebiet. Ein Fruchtlandstreifen von nie mehr als 200 Meter Breite, der für intensiven Ackerbau genutzt wird, dahinter liegen kleine Dörfer. Tief eingeschnitten der Nil. Fruchtbare Inseln inmitten gefährlicher Stromschnellen.

Sie sagten, der 4. Katarakt sei schwer zugänglich. Wie kommen Sie zu Ihrem Arbeitsplatz?

Wir entsprechen nicht gerade dem oft auch im Fernsehen vermittelten Bild der Archäologen, die in schnittigen Jeeps über sandige Wüstenpisten jagen. In Khartoum laden wir einen betagten Geländewagen, der uns gehört, sowie gemietete Autos und einen Lkw mit allem voll, was zwölf Archäologen in zehn Wochen benötigen, von den Nudeln über die Wasserfilteranlage bis zum Laptop. Dann fahren wir zwei bis drei Tage lang nilabwärts. Wobei »fahren« ein bisschen übertrieben ist. Denn mehr als Schritttempo ist speziell im Kataraktgebiet kaum drin, sonst wären auf Grund der scharfkantigen Felsen ständige Reifenpannen vorprogrammiert. Übernachtet wird unterwegs in der Wüste.

Und in dieser Einöde leben Menschen?

Die Manasir haben ihre Lebens- und Wirtschaftsweise optimal an die Umwelt angepasst. Sie nutzen die fruchtbaren Uferstreifen des Nils beziehungsweise die Inseln für den Anbau von Dattelpalmen und Feldfrüchten. Nomadische

---

► gen Ende der Altsteinzeit war die Gegend offenbar attraktiv, denn ein feuchteres Klima als heute ließ seinerzeit eine Savannenlandschaft entstehen, die mit reichlich Beute aufwartete. Im 5. Jahrtausend v. Chr. kam die Viehzucht in die Region. Vor 6000 Jahren wandelte sich das Klima, die Savanne wich der Wüste, und das Leben zog sich an die Ufer des Nils zurück.

Diese wurden auch im 3. Jahrtausend v. Chr. intensiv genutzt. Entgegen bisherigen Annahmen reichte die damals am 3. Katarakt blühende Kerma-Kultur in das heute von der Überflutung bedrohte Gebiet hinein. Das beweisen hunderte Fundstätten, insbesondere die reichen Beigaben auf diversen Friedhöfen. Erst im 2. und 1. Jahrtausend v. Chr., zur Zeit der Reiche von Napata und später Meroe, scheint der 4. Katarakt tatsächlich ins kulturelle Abseits geraten zu sein – Funde aus dieser Zeit gibt es bislang wenige. Immerhin entdeckten Archäologen vom Britischen Museum bereits Überreste einer kleinen Pyramide: das Grab eines Vornehmen aus der napatanischen Zeit (8.–4. Jahrhundert v. Chr.). Erst zur Zeit des europäischen Mittelalters erfreute sich die Region wieder großer Beliebtheit. Christliche Königreiche im Niltal haben dort ihre Spuren hinterlassen. Die deutschen Archäologen entdeckten auf der Insel Us beispielsweise eine kleine Kirche aus dem 13. Jahrhundert (Foto S. 31). Der griechischen Inschrift auf dem Gründungsziegel zufolge war sie dem Apostel Jakobus und Maria, der Mutter Jesu Christi, geweiht.

Die Ausgrabung eines wesentlich größeren und vermutlich älteren Gotteshauses stand für 2006 auf dem Programm – es musste warten. Nun sind die deutschen Archäologen wieder vor Ort (Stand Ende

Viehzüchter leben in der Wüste des Hinterlandes; sie bringen ihre Tiere auf die Märkte am Fluss.

Wie geht nun Ihre Reise ins Untersuchungsgebiet weiter?

Ein Boot samt Bootsführer setzt uns auf eine Insel über, wo wir Quartier beziehen; meist mieten wir ein leer stehendes Gehöft an. Nur die Einheimischen kennen die gefährlichen Untiefen, Strudel und Stromschnellen. Noch jedes Mal drohte das Boot zu kentern, wenn die ganze Elektronik an Bord war. Und natürlich müssen wir unsere Ausrüstung auf der Insel durch unwegsames Gelände schleppen. Archäologie am 4. Katarakt ist echte Knochenarbeit.

Die einen aber mit Erkenntnisgewinn belohnt?

Auf jeden Fall! Niemand hätte erwartet, dass beispielsweise die Kerma-Kultur so weit verbreitet war. Niemand hätte erwartet, dass es im Mittelalter ein so blühendes Christentum am 4. Katarakt gab – und dass wir so erstaunlich gut erhaltene Kirchen finden würden.

Angesichts dessen ist die Zahl der Archäologen, die dem Aufruf des Sudan gefolgt sind, vergleichsweise klein. Warum wird die Unesco nicht aktiv?

Das kann ich Ihnen nicht sagen. Unesco-Mitarbeiter sind zwar derzeit im Sudan, doch nur, um die Aufnahme anderer Altertümer, etwa der Ruinenstätten Napata, Kurru und Nuri, in die Liste des Weltkulturerbes zu prüfen. Diese sind lediglich etwa fünfzig Kilometer vom geplanten Damm entfernt.

OHNE DIE HILFE einheimischer Fährmänner würden Stromschnellen den Projekten auf den Inseln wohl ein rasches Ende bereiten.

Ihre Grabungskonzession läuft im Sommer 2007 aus. Steht die Gegend dann bald unter Wasser?

Wir wissen das nicht. Solche Angaben werden von der sudanesischen Regierung unter Verschluss gehalten. Klar ist: Wenn dort keine Manasir mehr wohnen, die uns über den Fluss fahren, mit Lebensmitteln versorgen und bei der Grabung helfen, sind archäologische Arbeiten nicht mehr möglich.

Das Projekt der Humboldt-Universität umfasst auch ethnologische Feldforschung. Ist das auch so eine Art Notgrabung?

Leider ja. Die noch nie wissenschaftlich dokumentierte Kultur der Manasir wird verschwinden. Denn ihre Lebens- und Wirtschaftsweise ist nun einmal an die Umwelt des Katarakts angepasst. Das beginnt bei der Aufteilung der Feldarbeit nach Geschlechtern. Dort, wo künstliche Bewässerung und damit härteste körperliche Arbeit erforderlich ist, finden Sie die Männer. Die ufernächsten Bereiche, die vom Nil überflutet werden, gehören dagegen den Frauen und werden von ihnen selbst bebaut.

Und das verschafft diesen eine eigene wirtschaftliche Basis, stärkt ihre Rolle in der Gemeinschaft. In den neuen Dörfern gibt es diese Möglichkeiten nicht mehr. Allein das wird die Sozialstruktur völlig umkrempeln. Oder nehmen Sie die Nomaden. Ohne den Tauschhandel mit den sesshaften Bauern, zum Beispiel Vieh gegen Feldfrüchte und Datteln, bricht auch deren Lebensgrundlage zusammen. Es ist übrigens sehr ungewöhnlich, dass sich Nomaden und Bauern als ein Stamm und sozial gleichberechtigte Partner verstehen.

Der Bau des Assuanstaudamms machte in den 1960er Jahren zehntausende Nubier heimatlos. Wird sich deren Schicksal wiederholen?

Ja. Es ist mir unbegreiflich, dass die Tragweite des Problems angesichts dieser Erfahrungen nicht gesehen wird. Die Menschen wurden damals traumatisiert und haben den Verlust der Heimat bis heute nicht überwunden. Wir haben versucht, humanitäre Organisationen auf das Problem aufmerksam zu machen. Doch vielleicht ist unsere Welt mit Krisen übersättigt, man denke nur an Sudans Krisenregion Darfur. Bevor die Manasir nicht in den Slums von Khartoum angekommen sind, besteht wohl noch kein Handlungsbedarf.

Das Interview führte **Klaus-Dieter Linsmeier**.

Februar), denn die Regierung versprach so bald als möglich eine Lösung für die Probleme der Manasir zu finden. Das ist allerdings bislang nicht geschehen. Außer den Wissenschaftlern der Humboldt-Universität erhielt zudem nur ein polnisches Team die Erlaubnis der Manasir-Führer, im Gebiet zu arbeiten. Dieses Entgegenkommen der Stammesführer verdanken die deutschen Archäologen sicher auch ihren Bemühungen um die Erforschung der Kultur dieses Volkes (siehe Interview). Als Anfang März aber immer noch keine Einigung zwischen Regierung und Stammesvertretern erfolgt war, sollten alle Grabungen abgebrochen werden. Um dennoch weiter vor Ort forschen zu dürfen, versprachen die Berliner nun, Funde außer Landes zu bringen – sie sollen nach dem Willen der Manasir in einem noch zu bauenden Museum zu sehen sein.

Professionelle Raubgräber hatten jedoch mittlerweile den 4. Katarakt für sich entdeckt. Für die Archäologen bleibt aber immer noch genügend zu tun. Eine Kirchenruine beispielsweise erwies sich bereits als bedeutend größer als erwartet. Vermutlich handelt es sich sogar um ein Kloster. Neben Resten von Mauern und bemaltem Putz kam zudem überraschend ein einmaliger Fund zu Tage: Reste von Pergament, in Altnubisch und Griechisch beschrieben. Eine der Seiten beginnt mit einem »Halleluja«, es handelt sich also sicher um eine Sammlung religiöser Schriften. Vielleicht gar ein apokryphes Evangelium? Wer weiß, was dieser scheinbare Hinterhof der Geschichte noch zu bieten hat. ◀

Über aktuelle Entwicklungen unterrichten wir Sie auf unserer Webseite unter www.abenteuer-archaeologie.de.